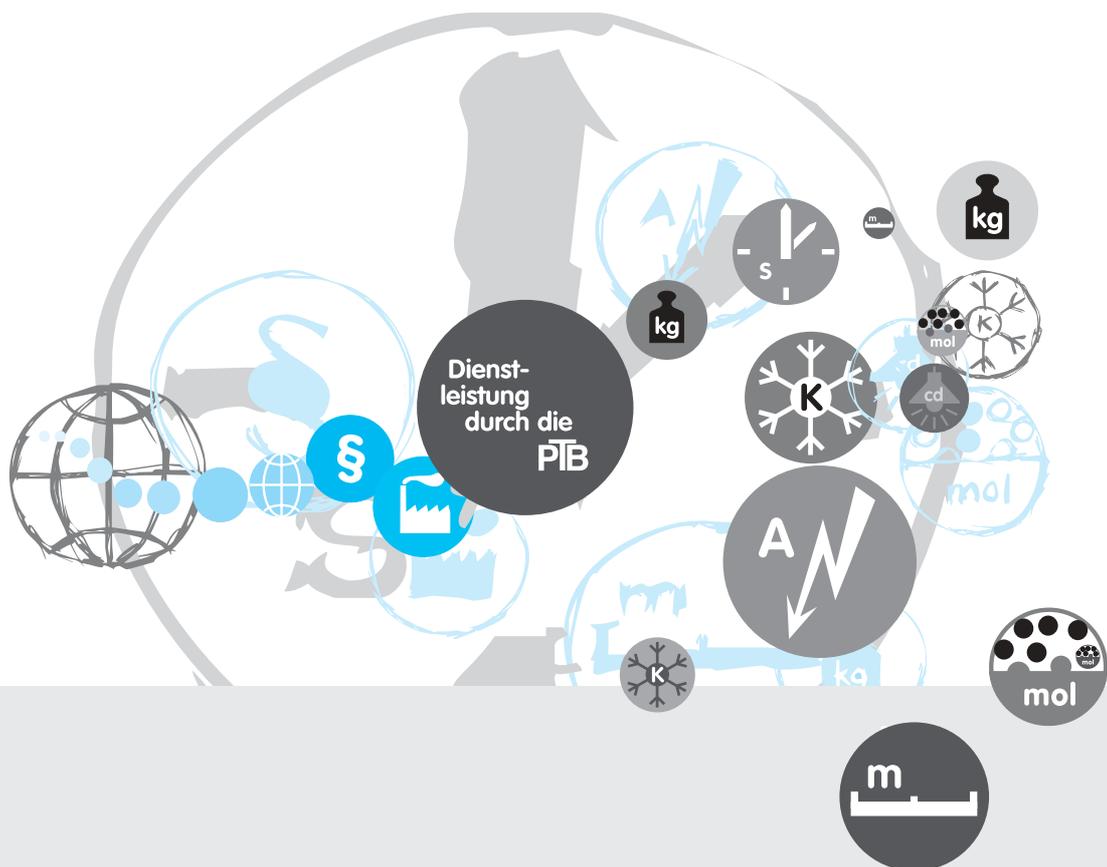


Physikalisch- Technische Bundesanstalt

Braunschweig und Berlin

Jahresbericht 2008



Vorwort

„In der PTB werden FuE-Arbeiten sowie wissenschaftsbasierte Dienstleistungen erbracht, die insgesamt von sehr guter, in Teilen von exzellenter Qualität sind“, stellt der Wissenschaftsrat in seiner wissenschaftspolitischen Stellungnahme zur Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) Braunschweig und Berlin fest, die er am 8. Mai 2008 veröffentlicht hat. Nach dem ebenfalls ausgezeichneten Ergebnis der Evaluation aus dem Jahr 2002 ist dies für uns Bestätigung, auf gutem Wege zu sein.

Gleichzeitig ist es für uns alle Ansporn und Verpflichtung, das hohe Niveau zu sichern und – wo immer nötig – auszubauen. Dass uns dies auch gelingt, davon soll u. a. der vorliegende Jahresbericht Zeugnis ablegen. In den „Nachrichten des Jahres“ finden Sie neben einigen uns besonders erwähnenswert erscheinenden Veranstaltungen und Ereignissen auch einige der wissenschaftlichen „Highlights“ des letzten Jahres, wie z. B. die in einer Kooperation mit dem NIST (USA) erstmals realisierten programmierbaren 10V-SNS-Josephson-Spannungsnormale oder die Fortschritte bei der Bestimmung der Avogadrokonstanten mittels Isotopen-angereicherter ^{28}Si -Einkristallkugeln.

Auch in unseren Bemühungen, die europäische Metrologieforschung zu koordinieren, sind wir ein gutes Stück vorangekommen. Nachdem im Rahmen der ERA-NET-PLUS-Förderung inzwischen bereits 21 gemeinsame Forschungsprojekte des europäischen Metrologieforschungsprogrammes (EMRP) gefördert werden, hat die Europäische Kommission am 3. Dezember 2008 den sehr viel weitergehenden Antrag auf Förderung eines koordinierten europäischen Metrologieforschungsprogramms gemäß Artikel 169 des Einigungsvertrages mit einem Gesamtvolumen von 400 Mio. Euro dem Europaparlament und Ministerrat zur Abstimmung vorgelegt. Wir sind optimistisch, dass dieser Antrag in der jetzt noch laufenden Legislaturperiode des

europäischen Parlaments auch diese letzten Hürden nehmen wird.

Analog zum Vorgehen bei den 2008 angelauten EMRP-Projekten im Rahmen von ERA-NET-PLUS werden sich auch die Forschungsthemen im Rahmen der Artikel-169-Förderung größtenteils an „großen gesellschaftlichen Herausforderungen“ ausrichten. So wird zu Beginn des Programms das Thema „Energie“ im Vordergrund stehen.

Die PTB war in Unterstützung des BMWi an der Erarbeitung des neuen Einheitengesetzes maßgeblich beteiligt. Das neue Gesetz führt das alte Einheitengesetz (in der Zuständigkeit des BMWi) und das Zeitgesetz (in der Zuständigkeit des BMI) zusammen. Außerdem wurden die hoheitlichen Aufgaben der PTB um die Weitergabe der Einheiten mit der dazugehörigen Forschungstätigkeit erweitert.

Außerordentlich froh sind wir, dass mit Ende des Jahres 2008 unser „QUEST-Team“ in der Leitung komplett ist. Prof. Piet Schmidt, Universität Innsbruck, hat den Ruf der Universität Hannover auf eine W3-Professur angenommen und wird das QUEST-Institut in der PTB in Braunschweig leiten und Frau Dr. Tanja Mehlstäubler übernimmt die Leitung der Nachwuchsforschergruppe. Ihnen und ihren Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern ein herzliches Willkommen und viel Erfolg.

Allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern, die, so beschreibt es auch der Wissenschaftsrat, eine „Grundlage des beachtlichen Leistungsprofils der PTB“ sind, danke ich ausdrücklich für die gute Arbeit im vergangenen Jahr.

Ernst O. Göbel



Foreword

“At the PTB, R&D work accomplished as well as the scientific-based services rendered are overall of very good, in part, of excellent quality”, the Science Council established in its scientific-political comments on the Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) Braunschweig and Berlin, which it published on 8 May 2008. After the likewise excellent result of the evaluation of the year 2002, this provides confirmation for us that we are on the right path.

At the same time, it is for us all both an incentive and a duty to secure the high standard and expand it – wherever necessary. That we will also succeed with this is attested to by, among other things, the present Annual Report. In the “News of the Year” you will find – in addition to some activities and events which we deem worthy of mentioning – also some of the scientific “highlights” of the past year, as, e.g., the programmable 10V SNS Josephson voltage standard, realized for the first time in a cooperation with the NIST (USA), or the progress made in the determination of the Avogadro constant by means of isotopically enriched ^{28}Si single crystal spheres.

Also in our efforts to coordinate European metrological research, we have made good progress. After the – meanwhile – already 21 joint research projects of the European Metrology Research Programme (EMRP) have been funded within the scope of the ERA-NET-PLUS funding, the European Commission presented to the European Parliament and the Council of Ministers on 3 December 2008 the greatly extended application for the funding of a coordinated European Metrology Research Programme in accordance with Article 169 of the Unification Treaty, having a total volume of 400 million Euro, for approval. We are optimistic that this application will also clear these last hurdles in the current legislative period of the European Parliament.

Analogue to the course of action in the EMRP projects started in 2008 within the scope of ERA-NET-PLUS, also the research subjects within the scope of Article 169 funding will be largely aimed at “great social challenges”. Therefore at the beginning of the programme, the focus will be on the subject “energy”.

The PTB was, in support of the BMWi (Federal Ministry of Economics and Technology), instrumental in the working out of the new Units Act. The new act combines the old Units Act (under the responsibility of the BMWi) and the Time Act (under the responsibility of the BMI (Federal Ministry of the Interior)). Furthermore, the sovereign tasks of the PTB have been expanded to include the dissemination of the units with the corresponding research activity.

We are exceedingly glad that as of the end of the year 2008, the management of our “QUEST” Team is complete. Professor Piet Schmidt, University of Innsbruck, has accepted a W3 professorship at the University of Hannover and will head the QUEST Institute at the PTB in Braunschweig, and Dr. Tanja Mehlstäubler assumes the head of the Junior Research Group. A warm welcome to them and their staff members, and we wish them good luck.

All of the staff members who are – as also described by the Science Council – a “basis of the considerable performance profile of the PTB” I would like to thank most sincerely for the good work in the past year.

Ernst O. Göbel

Der gedruckte Teil des Jahresberichts liefert Ihnen in überschaubarer Form einen Überblick über die PTB im Jahre 2008. Den kompletten Jahresbericht mit Nachrichten und speziellen Listen finden Sie auf den Internetseiten der PTB (unter www.ptb.de im Bereich „Publikationen“).

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

Jahresbericht im Internet

- Vorwort
- Nachrichten des Jahres
- Aus den Abteilungen
 - Abteilungsleiterberichte
 - Nachrichten
 - Tätigkeitsbereiche
 - Forschungsvorhaben
 - Kooperationen
- Kuratorium
- Organigramm (Stand: Dezember 2008)
- Zahlen und Fakten
 - Aktuelle Statistiken
- Anhang
 - Arbeitsgebiete und Ziele
 - Seminare/Workshops/Konferenzen
 - Kolloquien
 - Zulassungen des Eichwesens
 - Mitarbeit in nationalen und internationalen Gremien
 - Externe Lehrtätigkeit
 - Promotionen
 - Projekte der Technischen Zusammenarbeit
- Datenbank Publica
 - Wissenschaftliche Veröffentlichungen

Inhaltsverzeichnis

Vorwort • Foreword

Nachrichten des Jahres • News of the year

Fachabteilungen • Scientific Divisions 6

Theoretische Physik • Theoretical Physics 16

Kuratorium • Board of Consultants 19

Präsidium • Presidential Board 22

Qualitätsmanagement • Quality Management 28

Technologietransfer • Technology Transfer 29

Gesetzliches Messwesen • Legal Metrology 30

Technische Zusammenarbeit • Technical Cooperation 32

Verwaltung • Administrative Services 34

Presse- und Öffentlichkeitsarbeit • Press and Information Office 35

Zahlen und Fakten • Figures and facts 38

Berichte der Abteilungen

Mechanik und Akustik 49

Elektrizität 63

Chemische Physik und Explosionsschutz 75

Optik 87

Fertigungsmesstechnik 101

Ionisierende Strahlung 113

Temperatur und Synchrotronstrahlung 127

Medizinphysik und metrologische Informationstechnik 147

Der Deutsche Kalibrierdienst 162

Anhang

Kuratorium 165

Organigramm 166

Arbeitsgebiete 168

Geländepläne 172

Nachrichten des Jahres • News of the Year

50 Jahre Geschwindigkeitsüberwachung

Seit inzwischen 50 Jahren erteilt die PTB in Deutschland Bauartzulassungen für Geschwindigkeitsmessgeräte zur amtlichen Überwachung des Straßenverkehrs. Anlässlich dieses Jubiläums organisierte der Fachbereich „Kinematik“ ein 2-tägiges PTB-Seminar (16.–17. September 2008) über Geschwindigkeitsüberwachungsgeräte, an dem über 130 in- und ausländische Teilnehmer aus verschiedenen Bereichen, wie Hersteller, Anwender, Gutachter und Eichbehörden, teilnahmen. Das PTB-Seminar war eine gute Gelegenheit, ein breites Fachpublikum über die historischen Geräte, vor allem aber über technische Neuerungen, neue Vorschriften und aktuelle Entwicklungen bei der Prüfung und Zulassung von Geschwindigkeitsmessgeräten zu informieren.

Eine völlig neue Geräteart basiert auf Laserscannern mit Tracking der vorbeifahrenden Fahrzeuge über eine Strecke von ca. 25 m. Da digitale Kameras mit kryptografischem Schutz der Daten sich immer mehr durchsetzen, wurden PTB-Anforderungen bezüglich der Algorithmen und des Schlüsselmanagements erstellt. Moderne Lichtschranken- und zukünftig wohl auch Verkehrsradargeräte bieten mit einer zusätzlichen Entfernungsmessung erhebliche Vorteile bei der Zuordnung des Geschwindigkeitsmesswertes zu einem Fahrzeug im dichten Verkehr. Eine weitere Neuerung bildet die komplett überarbeitete Referenzanlage der PTB für Geschwindigkeitsmessungen, mit der die Prüfmöglichkeiten für kritische Situationen erheblich verbessert wurden. Die aktuellste Innovation stellt ein im Juli 2008 zugelassener Zweiradprüfstand dar, der erstmalig eine systematische Korrektur der Reibungseinflüsse beinhaltet.

Teilnehmer des PTB-Seminars „50 Jahre Geschwindigkeitsüberwachung mit Zulassung der PTB“

Participants at the PTB seminar "50 years of monitoring speed with PTB's approval"

50 years of monitoring speed

For 50 years PTB has issued type approvals for speed measuring instruments in Germany for the official monitoring of road traffic. On the occasion of this anniversary, the "Kinematics" Department organized a 2-day PTB seminar (16–17 September 2008) on instruments for speed control, in which over 130 national and international participants from various fields, such as manufacturers, users, experts and verification authorities took part. The PTB seminar was a good opportunity to inform a wide specialized audience about historic instruments, but above all about technical innovations, new regulations and current developments in testing and approving speed measuring instruments.

A completely new type of instrument is based on laser scanners with the tracking of vehicles driving past over a distance of approx. 25 m. As digital cameras with the cryptographic protection of data are catching on more and more, PTB requirements regarding algorithms and key management have been drawn up. Modern light barriers and in the future also road traffic radar devices offer – with an additional distance measurement – considerable advantages in attributing the speed value measured to a vehicle documented in a photo in heavy traffic. Another innovation is PTB's reference facility – completely redesigned – for speed measuring, with which the testing possibilities for critical situations were considerably improved. The latest innovation was a cycle test facility approved in July 2008, which for the first time contains a systematic correction of the influence of friction.



Programmierbare 10V-SNS-Spannungsnormale für 70 GHz

Mit programmierbaren Josephson-Spannungsnormalen lassen sich Gleich- und Wechselspannungen hochgenau erzeugen und messen. Binär geteilte Schaltungen erschließen dabei den messtechnisch wichtigen Bereich bis 10 V. Wegen der Schalttransienten eignen sie sich besonders für Anwendungen mit Frequenzen ≤ 1 kHz.

Die bisher von der PTB hergestellten programmierbaren Spannungsnormale basieren auf einer Reihenschaltung von etwa 70 000 SINIS-Kontakten (S = Supraleiter, N = Normalleiter, I = Isolator). Die Herstellung gelingt, aufgrund von Schädigungen der beiden extrem dünnen Isolatorschichten, jedoch nur mit sehr geringer Ausbeute. Wesentlich stabiler und im Herstellungsprozess unempfindlicher sind dagegen SNS-Kontakte. Deren Einsatz war bisher materialbedingt nur bei Frequenzen deutlich unter 70 GHz möglich ($> 300\,000$ Kontakte für 10 V).

In Kooperation mit dem NIST (Boulder, USA) ist es nun erstmalig gelungen, programmierbare 10V-Spannungsnormale auf SNS-Basis für den Betrieb bei 70 GHz zu realisieren. Möglich wurde dies durch spezielle Normalleiter-Barrieren aus $\text{Nb}_x\text{Si}_{1-x}$, die durch Variation des Nb-Anteils exakt auf die gewünschte Treiberfrequenz abgestimmt werden können. Während das NIST die Trilayer herstellte und optimierte, übernahm die PTB die weiteren Prozessschritte und den Test der Schaltungen. Die neuen 10V-SNS-Spannungsnormale zeichnen sich gegenüber den bisherigen SINIS-Schaltungen durch eine höhere Ausbeute bei gleichzeitig besseren Leistungsparametern aus.

Programmable 10V SNS voltage standards for 70 GHz

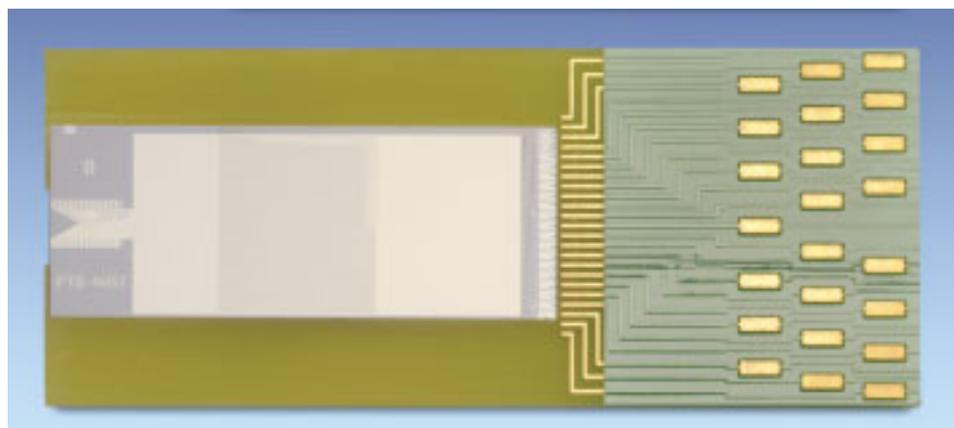
Programmable Josephson voltage standards allow d.c. and a.c. voltages to be generated and measured with ultra-high precision. Binary-divided series arrays thereby cover the metrologically important range up to 10 V. Due to the switching transients, they are particularly suited for applications at frequencies ≤ 1 kHz.

The programmable voltage standards manufactured by PTB so far are based on a series array of approx. 70 000 SINIS junctions (S = superconductor, N = normal metal, I = insulator). The fabrication yield is, however, very low due to the damage caused by the two extremely thin insulator layers. In contrast to this, SNS junctions are much more stable and less sensitive throughout the fabrication process. Because of characteristic properties, their use has so far been possible only at frequencies clearly below 70 GHz ($> 300\,000$ junctions for 10 V).

In cooperation with NIST (Boulder, USA), programmable 10V voltage standards based on SNS junctions for operation at 70 GHz have now been realized for the first time. This has become possible by using special normal metal barriers consisting of $\text{Nb}_x\text{Si}_{1-x}$, which can be exactly adjusted to the desired drive frequency by variation of the Nb content. Whereas NIST manufactured and optimized the trilayers, PTB was responsible for the other process steps and the testing of the circuits. Compared to the SINIS circuits used so far, the new 10V SNS voltage standards are characterized by a higher fabrication yield and, at the same time, improved characteristic parameters.

Programmierbares
10V-SNS-
Spannungsnormale

Programmable 10V
SNS voltage
standard



Eigensicher bei höheren Leistungswerten

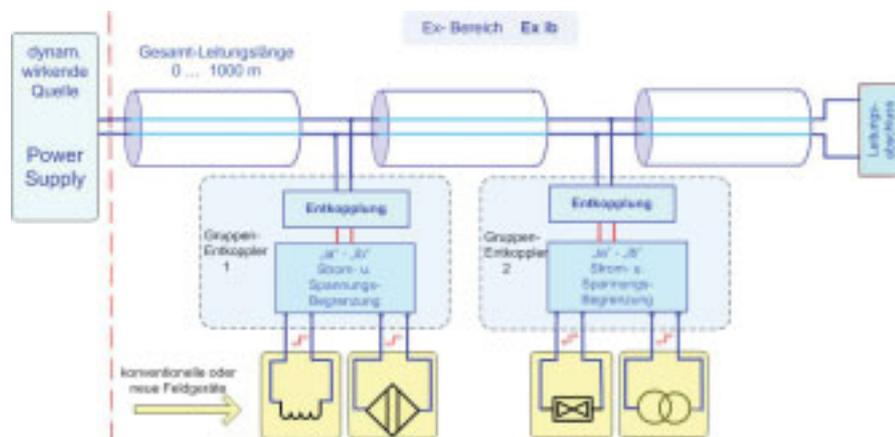
Im Explosionsschutz war die Zündschutzart „Eigensicherheit“ bisher mit einer stark begrenzten Wirkleistung – selten mehr als 3 W – verknüpft. Mit einem neuartigen, dynamisch wirkenden eigensicheren Energieversorgungskonzept (abgekürzt: DART) lassen sich dagegen erheblich höhere Leistungswerte unter Beibehaltung der eigensicheren Grundsätze erzielen.

Der Lösungsansatz basiert darauf, sicherheitsrelevante Stromänderungen in einem System auszuwerten. Dadurch lassen sich Störzustände (z. B. Zündfunken) schnell erkennen und das System kann – falls erforderlich – unmittelbar in einen sicheren Zustand (z. B. durch Abschaltung) überführt werden. Die sicherheitsrelevante Zeitvorgabe ergibt sich hierbei aus der Funkendauer möglicher zündfähiger Funken. Die Überführung in den sicheren Zustand muss so schnell erfolgen, dass sich kein zündfähiger Funke ausbilden kann, wobei wegen des komplexen Zusammenspiels von Energieversorgung, Leitung und Verbrauchern (z. B. Feldgeräten, Magnetventilen) diese als System zu betrachten sind.

Eine mögliche Anwendung dafür ist eine Punkt-zu-Punkt-Verbindung; hier können Leistungen bis zu 50 W bereitgestellt werden. Diese Lösung wurde im Rahmen eines AIF-Projektes mit mehreren Industriepartnern erarbeitet. Der zweite Ansatz ist für Feldbusanwendungen mit verteilter, dezentraler Topologie und großen Leitungslängen optimiert. Hier arbeitet die PTB mit der Firma Pepperl+Fuchs aus Mannheim zusammen. Der „DART-Feldbus“ wurde dabei für den „Hermes-Award“ (höchstdotierter deutscher Technologiepreis) nominiert und erzielte ein großes Echo in den Fachmedien.

Beispiel eines DART-Feldbussystems

Example of a DART field bus system



Intrinsically safe at higher power values

In explosion protection, the type of protection "intrinsic safety" has so far been associated with severely limited active power – rarely more than 3 W. A novel, dynamically working intrinsically safe energy supply concept (abbreviated to "DART"), however, allows considerably higher power values to be achieved while the principles of intrinsic safety are maintained.

The approach is based on an evaluation of safety-relevant current changes in a system. This allows faulty conditions (e. g. ignition sparks) to be rapidly detected and the system can – if necessary – immediately go into a safe state (e. g. by shut-down). Here, safety-relevant timing results from the spark duration of potentially incendive sparks. Transfer into the safe state must be fast acting so that no incendive spark can be developed. Due to the complex interaction of the energy supply, the cable and the load (e. g. field devices, solenoid valves), these are regarded as a system.

A possible application is a point-to-point connection, where powers of up to 50 W can be made available. This solution was elaborated within the scope of an AIF project in cooperation with several partners from industry. PTB cooperates with the Pepperl+Fuchs company, Mannheim, in a second approach optimized for field bus applications with distributed, decentral topology and large cable lengths. The "DART field bus" was nominated for the "Hermes Award" (which is the most highly remunerated German technology award) and met with a great resonance in the specialized media.

QUEST-Institut in der PTB

Zum Exzellenz-Cluster QUEST (Centre for Quantum Engineering and Space-Time Research), das an der Leibniz-Universität Hannover (LUH) im Rahmen der Exzellenzinitiative eingerichtet wird, trägt die PTB in prominenter Weise bei. Hierzu werden eine gemeinsame Professur mit der LUH, eine Nachwuchswissenschaftlergruppe und eine Projektgruppe neu eingerichtet. Neben der PTB sind weitere Partner an dem Cluster beteiligt: das Laserzentrum Hannover, das Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik sowie das Zentrum für angewandte Raumfahrttechnologie und Mikrogravitation.

Im vergangenen Jahr konnte dazu die Berufung zur neuen Professur „Experimentelle Quantenmetrologie“ gemeinsam zwischen der LUH und der PTB in kürzester Zeit erfolgreich abgeschlossen werden. Neue Laborräume und Büros werden im Max-von-Laue-Bau der PTB eingerichtet und sind zum Jahresbeginn 2009 bezugsfertig.

Die QUEST-Arbeitsgruppen werden neue Forschungsrichtungen aufnehmen und verstärken, die bisher weder in der PTB noch an der LUH in erforderlicher Tiefe verfolgt werden können. Dazu gehören die Nutzung der Quantenlogik für Präzisionsspektroskopie und optische Atomuhren („Experimentelle Quantenmetrologie“), Vielfachionenfallen und -wechselwirkung (Nachwuchsforschergruppe) sowie die Entwicklung superstabiler Laser (Projektgruppe).

Leiter und Leiterin der neu eingerichteten Arbeitsgruppen des QUEST-Instituts in der PTB: Professor Piet O. Schmidt (Professur für Experimentelle Quantenmetrologie), Dr. Tanja Mehlstäubler (Nachwuchsforschergruppe) und Dr. Thomas Kessler (Projektgruppe).

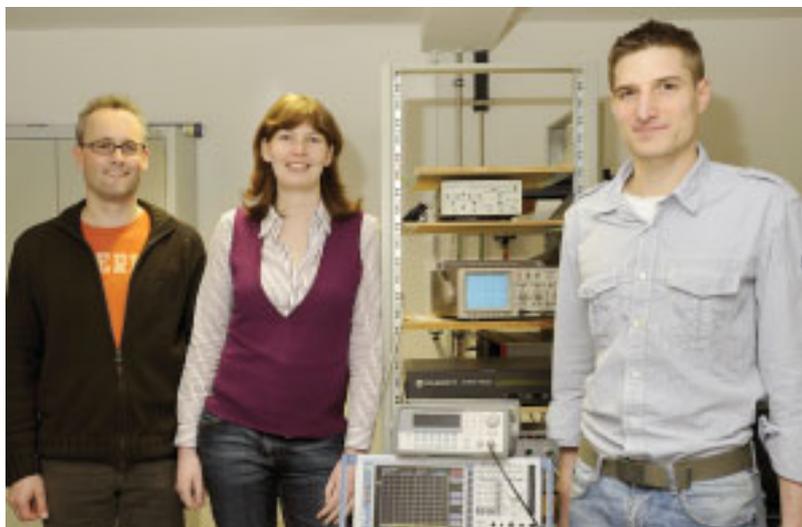
Heads of the newly set up working groups of the QUEST Institute at the PTB: Professor Piet O. Schmidt (Professorship for Experimental Quantum Metrology), Dr. Tanja Mehlstäubler (Junior Research Group) and Dr. Thomas Kessler (Project Group).

QUEST Institute at the PTB

The PTB contributes prominently to the QUEST (Centre for Quantum Engineering and Space-Time Research) Excellence Cluster, which is being established by the Leibniz University of Hannover (LUH) within the scope of the Excellence Initiative. For this purpose, a joint professorship with the LUH, a junior research group and a project group will be newly set up. In addition to the PTB, there are further partners contributing to the cluster: the Hannover Laser Centre, the Max Planck Institute for Gravitational Physics, as well as the Center of Applied Aerospace Technology and Microgravitation.

In the past year, it was possible to successfully assign the new professorship “Experimental Quantum Metrology” jointly between the LUH and the PTB in a very short time. New laboratory rooms and offices are being equipped in the Max von Laue Building of the PTB and will be ready for occupancy by the beginning of 2009.

The QUEST working groups will enter and reinforce new fields of research, which so far could – neither at the PTB nor at the LUH – be followed to the necessary depth. These include the use of quantum logic for precision spectroscopy and optical atomic clocks (“Experimental Quantum Metrology”), multiple ion traps and ion interaction (Junior Research Group) as well as the development of superstable lasers (Project Group).



Auf dem Weg zu einer neuen Avogadrokonstanten

Ein internationales Konsortium, bestehend aus den Metrologieinstituten von Australien, Deutschland, Großbritannien, Japan und den USA, Spezialinstituten aus Belgien, Deutschland und Russland sowie dem BIPM (Bureau International des Poids et Mesures in Paris) hat sich vorgenommen, die Avogadrokonstante mit einer verbesserten Unsicherheit zu bestimmen. Sie gibt die Anzahl der Atome in einem Mol an und ist ein Maß für die Stoffmenge – eine wichtige Grundgröße in der Chemie. Die Avogadrokonstante ist aber auch geeignet, das Kilogramm zu beschreiben. Sie muss allerdings mit einer Gesamtunsicherheit von 1 bis $2 \cdot 10^{-8}$ bekannt sein, um die nötige Unsicherheit in der Massedefinition zu gewährleisten.

Die Avogadrokonstante ist das Verhältnis zwischen makroskopischer und mikroskopischer Dichte eines Stoffes. Als Ausgangsstoff wurde hochangereichertes ^{28}Si gewählt, das in russischen Zentrifugen angereichert und im Institut für Kristallzüchtung, Berlin, zu einem Einkristall gezogen wurde. Der Kristall war gerade groß genug, um Material für zwei Kugeln zur Bestimmung der makroskopischen Dichte sowie für das Röntgeninterferometer zur Bestimmung des Gitterabstandes (mikroskopische Dichte) zu liefern. Am australischen Metrologieinstitut wurden höchstpräzise Kugeln mit einem Gewicht von jeweils ziemlich genau einem Kilogramm hergestellt. Anschließend wurde das Volumen der einen Kugel im japanischen Metrologieinstitut und das der anderen im Kugelinterferometer der PTB bestimmt. Das Ergebnis des Kugelinterferometers: Es ist eine Kugel von bisher nicht erreichter Oberflächengüte, bestens geeignet, um die geforderten Unsicherheiten zu erreichen. Damit ist ein wesentlicher Schritt auf dem Weg zu einer neuen Avogadrokonstanten – und vielleicht zu einer neuen Definition der Masse – gemacht worden.

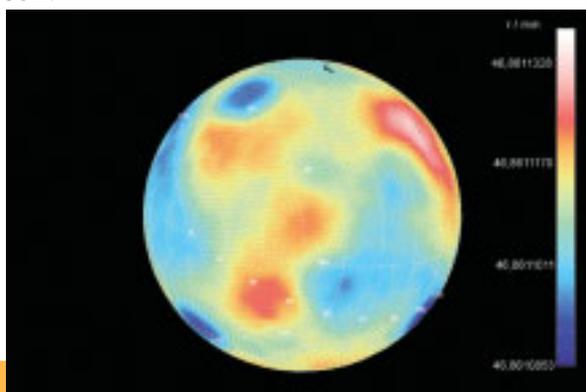
Die Form der ^{28}Si -Kugel weicht um weniger als 50 nm von einer Idealkugel ab.

The shape of the ^{28}Si sphere deviates by less than 50 nm from an ideal sphere.

On the path to a new Avogadro constant

An international consortium, consisting of the metrology institutes of Australia, Germany, Great Britain, Japan and the USA, special institutes from Belgium, Germany and Russia as well as the BIPM (Bureau International des Poids et Mesures in Paris) have resolved to determine the Avogadro constant with an improved uncertainty. It specifies the number of atoms in one mole and is a measure of the amount of substance – an important base quantity in chemistry. The Avogadro constant is, however, also suited to describe the kilogram. But it must be known with a total uncertainty of 1 to $2 \cdot 10^{-8}$, in order to ensure the necessary uncertainty in the mass definition.

The Avogadro constant is the ratio between the macroscopic and the microscopic density of a material. As source material, highly enriched ^{28}Si was selected, which was enriched in Russian centrifuges and cultivated to a single crystal in the Institut für Kristallzüchtung (Institute for Crystal Growth), Berlin. The crystal was just large enough to provide material for two spheres for determining the macroscopic density as well as for the X-ray interferometer to determine the lattice spacing (microscopic density). At Australia's metrology institute, highly precise spheres with a weight of almost exactly one kilogram each were produced. Subsequently, the volume of one of the spheres was determined in the National Metrology Institute of Japan and the volume of the other determined in the sphere interferometer of PTB. The result of the sphere interferometer: It is a sphere of so far unattained surface quality, most suitable for attaining the required uncertainties. Thus, an essential step has been taken on the path to a new Avogadro constant – and perhaps to a new definition of the mass.



Richard-Glocker-Bau eingeweiht

Mit drei neuen Elektronenbeschleunigern erweitert die PTB ihre Messmöglichkeiten für die Dosimetrie in der Strahlentherapie. Am 11. Juli 2008 haben PTB-Präsident Prof. Dr. Ernst O. Göbel und Staatssekretär Jochen Homann aus dem Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie den Richard-Glocker-Bau, der die Beschleuniger beherbergt, auf dem Braunschweiger PTB-Gelände offiziell eingeweiht.

In Gesprächen mit dem Präsidium und bei einem Rundgang durch verschiedene Laboratorien auf dem PTB-Gelände in Braunschweig konnte sich Homann einen Eindruck von Umfang und Qualität der Arbeit der PTB verschaffen. Gleichzeitig überbrachte er in einer Ansprache an die Beschäftigten die Glückwünsche von Bundesminister Glos, dessen Ministerium die PTB als Bundesoberbehörde zugeordnet ist, zur hervorragenden Evaluation durch den Wissenschaftsrat und sicherte die weitere Unterstützung der PTB zu.

Bereits im September 2007 waren zwei Beschleuniger vom Typ „Elekta Precise“ im Richard-Glocker-Bau in Betrieb gegangen. Diese Geräte, die auch in Kliniken eingesetzt sind, erzeugen sechs Referenzstrahlungsfelder für Photonenstrahlung und zehn Referenzfelder für Elektronenstrahlung. Damit ist der in der Praxis vorkommende Energiebereich – 4 MeV bis 25 MeV – vollständig abgedeckt.

Zusätzlich können mittels Lamellenkollimator besonders kleine und unregelmäßig geformte



Richard Glocker Building dedicated

With three new electron accelerators, PTB has expanded its measurement capabilities for dosimetry in radiation therapy. On 11th July 2008, PTB-president Prof. Dr. Ernst O. Göbel and State Secretary Jochen Homann from the Federal Ministry of Economics and Technology, officially dedicated at the PTB site in Braunschweig, the Richard Glocker Building, which houses the accelerator.

In talks with the Presidential Board and on a tour through various laboratories on the PTB site in Braunschweig, Homann was able to gain an impression of the extent and quality of the work of PTB. At the same time, Homann, in a speech addressed to the employees, conveyed the good wishes of Federal Minister Glos – whose ministry, as superior federal authority, the PTB is assigned to – for the outstanding evaluation by the Science Council and assured the further support of the PTB.

Already in September 2007, two accelerators of the “Elekta Precise” type were put into operation in the Richard Glocker Building. These apparatuses which are also employed in clinics, produce six reference radiation fields for photon radiation and ten reference fields for electron radiation. Thus the energy range found in practice – 4 MeV to 25 MeV – is fully covered.

In addition, especially small and irregularly shaped radiation fields can be produced by means of lamella collimators. These deviate strongly from the usual reference conditions, but are of great importance for the new clinical radiation techniques. Investigations of dosimetry under these special radiation conditions will constitute a main focus of the work in the Richard Glocker Building.

Beschleunigungsstrecke und Strahlleitsystem des Forschungsbeschleunigers. Im Vordergrund werden die Elektronen die Endenergie 50 MeV erreichen. Blau: Quadrupolmagnete zur Strahlfokussierung.

Acceleration path and beamline of the research accelerator. In the foreground, the electrons will reach the final energy of 50 MeV. Blue: quadrupole magnets for beam focusing.

Strahlungsfelder erzeugt werden. Diese weichen von den üblichen Referenzbedingungen stark ab, sind aber für die neuen klinischen Bestrahlungstechniken von großer Bedeutung. Untersuchungen zur Dosimetrie unter diesen speziellen Bestrahlungsbedingungen werden einen Schwerpunkt der Arbeiten im Richard-Glocker-Bau bilden.

Der 11 Meter lange, speziell für die PTB entwickelte Linearbeschleuniger für die dosimetrische Grundlagenforschung wird gegenwärtig von der Herstellerfirma, ACCEL Instruments GmbH aus Bergisch-Gladbach, in Betrieb genommen.

Am Forschungsbeschleuniger kann die Elektronenenergie von 0,5 MeV bis 50 MeV stufenlos eingestellt werden. Ablenkmagnete und Blendensysteme sorgen für eine einzigartige Energieschärfe. Es können schmale, aufgefächerte und sogar bewegte Strahlenbündel erzeugt werden, sowohl mit Elektronen als auch – eine Besonderheit – mit Photonen. Dank dieser Flexibilität können auch zukünftig alle denkbaren Therapieformen simuliert werden, nicht nur die gegenwärtig aktuellen.

Der Richard-Glocker-Bau verfügt über vier Bestrahlungsräume. In bis zu 3 Räumen kann gleichzeitig bestrahlt werden. Zu den Kernaufgaben zählen das Bereitstellen von Normalen der Einheit Gray für die Wasser-Energiedosis sowie das Prüfen, Verbessern und Entwickeln von Dosimetern und Dosismessverfahren.

Die dosimetrische Forschung studiert Erzeugungs- und Wirkungsmechanismen der Strahlung in Abhängigkeit von grundlegenden physikalischen Größen wie Energie und Stromstärke. Diese werden mit eigens konstruierten Spektrometern und Stromtransformatoren bestimmt. Die am Forschungsbeschleuniger gemessenen Werte für das Strahlungsbremsvermögen diverser Materialien werden Eingang in Planungs- und Simulationsprogramme finden, die heute unverzichtbare klinische Werkzeuge sind.

Staatssekretär Jochen Homann (links) bei seinem Rundgang durch die PTB

State Secretary Jochen Homann (left) at his tour through PTB

The linear accelerator, 11 meters long, particularly developed for PTB for fundamental dosimetric research is presently being put into operation by the manufacturer, ACCEL Instruments GmbH from Bergisch-Gladbach.

On the research accelerator, the electron energy from 0.5 MeV to 50 MeV can be continuously adjusted. Deflection magnets and diaphragms provide a unique energy sharpness. Narrow, expanded and even moving radiation beams can be produced both with electrons and – a specialty – with photons. Thanks to this flexibility, all imaginable forms of therapy can also be simulated in future, and not only the ones currently in use.

The Richard Glocker Building has four irradiation rooms. It is possible to irradiate in up to 3 rooms at the same time. The core tasks encompass the providing of standards of the unit 'gray' for the water absorbed dose, as well as the testing, upgrading and developing of dosimeters and dosimetric processes.

Dosimetric research studies the production and impact mechanisms of the radiation in dependence on fundamental physical quantities such as energy and current. They are determined with specially designed spectrometers and current transformers. The linear radiation stopping power for diverse materials, measured on the research accelerator, will find its way into planning and simulation programmes, which today are indispensable clinical tools.



Lange Nacht der Wissenschaften 2008

Der Auftakt zur Langen Nacht der Wissenschaften fand erstmals im Institut Berlin der PTB statt. Der Berliner Wissenschaftssenator, Prof. Dr. Jürgen Zöllner, eröffnete am 14. Juni 2008 mit über hundert Gästen aus Politik, Wissenschaft und diplomatischem Korps die mittlerweile achte Folge der „Langen Nächte“.

Nebelschwaden quellen aus einem Podest, darüber schwebt eine blaue Scheibe frei in der Luft. Darauf steht der Wissenschaftssenator und demonstriert die magnetische Abstoßung durch einen Hochtemperatursupraleiter. Neben der Levitation durch starke Magnetfelder wurde als Beispiel für schwächste Felder die diagnostische Aussagekraft der magnetischen Aufzeichnung menschlicher Hirnströme mit Hilfe einer Live-Schaltung in einer magnetisch abgeschirmte Kabine vorgeführt. Eine Gesprächsrunde mit Vertretern der Berliner Universitäten sowie der außeruniversitären Forschungseinrichtungen zum Thema Forschungsexzellenz rundete die Eröffnungsveranstaltung ab.

Das Motto der PTB für die Lange Nacht, „Magnetfelder sind überall“, wurde in vielen Bastel- und Mitmach-Experimenten demonstriert, an denen auch die kleinsten Besucher ihren Spaß hatten. Wie man Magnetfelder erzeugen, sichtbar, messbar und sich nutzbar machen kann, war dann auch für viele Erwachsenen neu. Ein Blick in den „magnetisch ruhigsten“ Raum der Erde zeigte dem Besucher die Umgebung, in der ohne die Beeinflussung von Erdmagnetfeld, Handysignalen und anderen Störquellen die schwachen magnetischen Signale des menschlichen Nervensystems mit Hilfe von tiefkalten supraleitenden Sensorschaltungen erforscht werden.

Prof. Dr. Jürgen Zöllner, Berliner Senator für Bildung, Wissenschaft und Forschung, wird von einer Magnetscheibe getragen, die stabil über einem stickstoffgekühlten Hochtemperatur-Supraleiter schwebt.

Long Night of Science 2008

The prelude to the Long Night of Science took place at the Berlin Institute of PTB for the first time. Berlin's Senator for Science, Prof. Dr. Jürgen Zöllner, opened the 8th "Long Night" on 14 June 2008 with over one hundred guests from politics, science and the diplomatic corps.

Clouds of fog stream out of the pedestal, a blue disc floats above them in the air. The Senator for Science is standing on the disc and demonstrating magnetic repulsion by a high-temperature superconductor. Besides levitation through strong magnetic fields, as an example of the weakest fields, the diagnostic usefulness of the magnetic sketching of human brain waves was demonstrated with the help of a live-connection in a magnetically shielded booth. A discussion by representatives of Berlin's universities as well as non-university research institutes on the subject of excellence in research rounded off the opening event.

PTB's theme for the Long Night "Magnetic Fields are Everywhere", was demonstrated in many creative, hands-on experiments which provided a lot of fun for the youngest visitors, too. How magnetic fields can be created, made visible, measurable and useful, was also new to many adults. A look into the "magnetically quietest" room on Earth showed the visitors the surroundings in which the weak magnetic signals of the human nervous system are researched with the aid of cryogenic superconducting sensor circuits without the influence of the Earth's magnetic field, mobile phone signals and other disturbing sources.

Prof. Dr. Jürgen Zöllner, Berlin's Senator for Education, Science and Research, is carried by a magnetic disc which is stably hovering above a nitrogen-cooled high-temperature superconductor.



THz-Radiometrie

Um Messdaten der Terahertz(THz)-Spektroskopie quantitativ interpretieren zu können, ist es notwendig, die spektrale Empfindlichkeit von THz-Strahlungsempfängern zu kennen. Erstmals konnte nun mit zwei komplementären und unabhängigen Methoden die Empfindlichkeit von Strahlungsempfängern im THz-Spektralbereich rückgeführt auf das internationale Einheitensystem gemessen werden.

Quellengestützt wurde die Empfindlichkeit bezüglich Bestrahlungsstärke auf der Grundlage berechenbarer Schwarzkörperstrahlung bei verschiedenen Frequenzen im Bereich von 4,82 THz (62 µm) bis 0,22 THz (1340 µm) bestimmt. Dies gelang durch die Kombination eines berechenbaren THz-Schwarzkörperstrahlers mit vermessenen THz-Lang- und Bandpassfiltern als frequenzselektive Elemente.

Detektorgestützt wurde die Empfindlichkeit bezüglich Strahlungsleistung mit einem Kryoradiometer, einem Strahlungsempfänger normal bei sehr tiefen Temperaturen, bestimmt. In Kooperation mit dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrttechnik wurde dabei ein Quantenkaskadenlaser als monochromatische, stabile Strahlungsquelle bei 2,5 THz (120 µm) eingesetzt. In ersten Experimenten wurde bereits eine Standardunsicherheit von 8 % erreicht, die sich durch eine verbesserte Absorption der THz-Strahlung im Kryoradiometer noch weiter reduzieren lässt.

Ein Vergleich der beiden Methoden über die Kalibrierung eines pyroelektrischen Detektors zeigte eine Übereinstimmung der Messergebnisse im Rahmen der kombinierten Messunsicherheit.

Einige spektrale Strahldichteverteilungen, die am quellengestützten THz-Messplatz zur Bestimmung der Empfindlichkeit zur Verfügung stehen.

Some of the spectral radiance distributions which are available at the source-based THz measuring station for responsivity

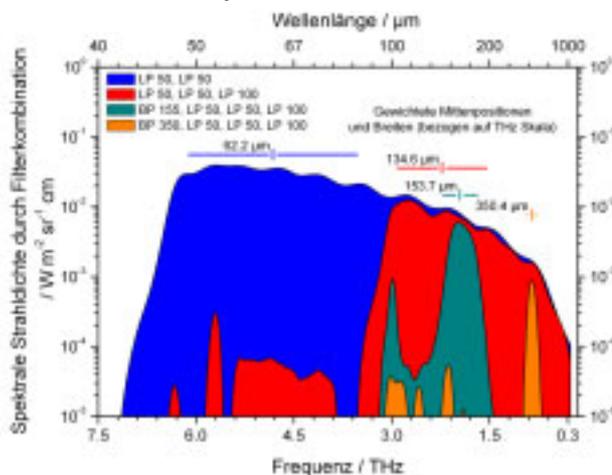
THz radiometry

To be able to quantitatively interpret terahertz (THz) spectroscopy measurement data, the spectral responsivity of THz radiation detectors must be known. For the first time it was possible to measure by means of two complementary and independent methods the responsivity of radiation detectors in the THz spectral range in such a way that it can be traced back to the International System of Units (SI).

Source-based, the irradiance responsivity of the detector was determined on the basis of calculable black-body radiation at different frequencies in the range from 4.82 THz (62 µm) to 0.22 THz (1340 µm). This was made possible by using a combination of a THz black-body radiator and calibrated THz long-wave and band-pass filters as frequency-selective elements.

Detector-based, the radiant power responsivity of the detector was determined by means of a cryogenic radiometer, a primary detector standard working at very low temperatures. In cooperation with the German Aerospace Center (DLR – Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrttechnik), a quantum cascade laser was used as a monochromatic, stable radiation source at 2.5 THz (120 µm). In first experiments, a standard uncertainty of 8 % could already be achieved which can be further reduced through an improved absorption of the THz radiation in the cryogenic radiometer.

A comparison of the two methods via the calibration of a pyroelectric detector showed an agreement of the measurement results within the combined measurement uncertainty.



7-Tesla-Magnet eingetroffen

Nach mehr als vier Jahren Planungs- und Vorbereitungszeit für ein Ultrahochfeld-Magnetresonanzzentrum in Berlin-Buch war die Ankunft des 7-Tesla-Magneten ein echter Meilenstein. Am 11. September 2008 wurde mit dem rund 32 Tonnen schweren Magneten das Herzstück des Tomographen an seinem neuen Standort, dem Experimental and Clinical Research Center (ECRC) auf dem Campus des Max-Delbrück-Centrums (MDC) für Molekulare Medizin in Berlin-Buch, angeliefert.

Das Berliner System wird weltweit der einzige Ganzkörper-Kernspintomograph der modernen „Ultrahochfeld“-Generation sein, an dem mit der PTB auch ein Metrologie-Institut beteiligt ist. Kernspintomographen mit dieser oder einer höheren Feldstärke arbeiten bislang noch nicht im Klinikbetrieb, sondern dienen ausschließlich der Forschung. Während dies an den allermeisten 7-Tesla-Standorten ausschließlich die Hirnforschung ist, sollen an dem Berliner System auch Herz und Kreislauf untersucht werden.

Für die PTB ergibt sich als anspruchsvolle Aufgabe, durch technische Entwicklungen und neue Messprozeduren das einzigartige Potenzial dieses Tomographen für klinische Anwendungen nutzbar zu machen. Zudem wird die PTB ideale Voraussetzungen vorfinden, um ihre Arbeiten zur Patientensicherheit in Hochfeld-Tomographen und zur Entwicklung neuer Konzepte in der MR-Bildgebung und -Spektroskopie weiter voranzutreiben. Neben dem MDC und der PTB sind die Charité und die Firma Siemens weitere Träger des Projekts. Komplettiert wird die neue Ultrahochfeld-MRT-Anlage des ECRC durch ein 9,4-Tesla-Kleintier-MRT der Firma Bruker, das drei Wochen vorher ausgeliefert wurde und bereits messbereit ist.

Der in Oxford gefertigte, 32 Tonnen schwere Magnet wird vom Transporter gehoben.



7 tesla magnet has arrived

After more than four years of planning and preparing for an ultra-high-field magnetic resonance centre in Berlin-Buch, the arrival of the 7 tesla magnet was a real milestone. On 11 September 2008, the new “heart” of the tomograph, a magnet weighing in at around 32 tonnes was delivered to its new location, the Experimental and Clinical Research Center (ECRC) on the campus of the Max Delbrück Center (MDC) for Molecular Medicine in Berlin-Buch.

The Berlin system will be the only whole-body magnetic resonance tomograph (MRT) of the modern ultra-high-field generation in the world, in which – with the PTB – a metrological institute is also participating. Magnetic resonance tomographs with this or a higher field strength have not yet been used in clinical operations, but have only served research purposes. While this has been solely brain research at most of the 7 tesla sites, the heart and circulation are also to be investigated by the Berlin system.

For the PTB, the challenge is to make the unique potential of this tomograph useful for clinical applications, through technical developments and new measurement procedures. The PTB will, moreover, find the ideal conditions to advance its work on patient safety in high-field tomographs and on the development of new concepts in MRT imaging and spectroscopy. Apart from the MDC and the PTB, the Charité and the Siemens company are the other bodies responsible for the project. The new ultra-high-field MRT equipment of the ECRC has been completed with a 9.4 tesla small animal MRT of the Bruker

company which was supplied three weeks previously and can already take measurements.

The 32-tonne heavy magnet, fabricated in Oxford, is lifted from the transporter.

Unordnungsinduziertes Aufspalten des Leitfähigkeitsmaximums am Dirac-Punkt in Graphen

Die außergewöhnlichen elektrischen und optischen Eigenschaften von Graphen – so nennt man eine einzelne Schicht aus Kohlenstoffatomen, welche ein zweidimensionales hexagonales Gitter bilden – werden weltweit mit zunehmender Intensität erforscht. Die erstmalige Herstellung dieser Substanz im Jahre 2004 hat eine lawinenartige Forschungsaktivität auch für die Grundlagenforschung ausgelöst. Zum Beispiel gestattet die ungewöhnliche elektronische Bandstruktur von Graphen, die mit ihrer linearen Dispersion bei kleinen Energien mit dem Spektrum der Dirac-Gleichung für masselose Fermionen in zwei Dimensionen übereinstimmt, die Untersuchung von Fragestellungen aus der Elementarteilchenphysik an einem realen zweidimensionalen Festkörper.

Für die Metrologie verspricht Graphen die Möglichkeit, den Quanten-Hall-Effekt bei wesentlich niedrigeren Magnetfeldern oder bei höheren Temperaturen zu messen. Damit wäre ein Weg zu einem mobilen Widerstandsnormale vorgezeichnet. Allerdings ist noch unklar, ob die an den üblichen GaAs-Heterostrukturen beobachtete Quantisierung mit dem an Graphen messbaren Wert übereinstimmt. Letztlich steckt dahinter die Frage nach der Universalität des von-Klitzing-Effekts, ob also Dirac-Fermionen innerhalb einer geringen Unsicherheit denselben quantisierten Widerstand zeigen wie normale Elektronen mit parabolischer Dispersion.

Diese Fragen sind auch Gegenstand aktueller theoretischer Untersuchungen in der PTB. Ebenso werden die Einflüsse der unvermeidbaren Unordnung in den Graphenschichten auf die elektrischen Transporteigenschaften studiert. Es hat sich gezeigt, dass für numerische Untersuchungen ein Mauerwerksgitter (Bild 1), welches die gleiche Topologie wie das hexagonale Gitter von Graphen aufweist, viel einfacher zu handhaben ist, insbesondere für die modellmäßige Behandlung von Unordnung im Gitter. Trotz der 90°-Bindungswinkel findet man im Mauerwerksgitter die gleichen Energieeigenwerte wie im Originalgitter, wobei der Energieplot eine verzerrte Brillouinzone mit ansonsten unveränderter

Disorder-induced splitting of the conductivity maximum at the Dirac point in graphene

Worldwide, the unusual electrical and optical properties of graphene – as we call a single layer of carbon atoms forming a two-dimensional hexagonal lattice – are investigated with increasing intensity. When this substance was prepared for the first time in 2004, it launched an avalanche-like research activity, also for fundamental research. For example, the unusual electronic band structure of graphene which – with its linear dispersion at low energies – agrees with the spectrum of the Dirac equation for massless fermions in two dimensions, allows questions from elementary particle physics to be studied on a real two-dimensional solid.

For metrology, graphene offers the possibility of measuring the quantum Hall effect at considerably lower magnetic fields or at higher temperatures. In this way, the path towards a mobile resistance standard is opened up. It is, however, still unclear whether the quantization observed on the usual GaAs heterostructures agrees with the value which can be measured on graphene. The question behind it refers ultimately to the universality of the von Klitzing effect, i.e. whether Dirac fermions exhibit – within a small uncertainty – the same quantized resistance as normal electrons with parabolic dispersion.

These questions are also the subject of current theoretical investigations at PTB. Likewise, the influences which the unavoidable disorder in the graphene layers has on the electric transport properties are studied. It has turned out that for numerical investigations, a brick-layer lattice (Figure 1) – which has the same topology as the hexagonal lattice of graphene – is much easier to handle, especially for the treatment of disorder models in the lattice. In spite of the bond angles of 90°, the same energy eigenvalues can be found in the brick-layer lattice and in the original lattice; the energy plot reveals a distorted Brillouin zone with otherwise unchanged topology. If, however, the bond lengths are changed – instead of the bond angles – the influence of a uniaxial pressure on the graphene lattice can be simulated. For this purpose, changed

Topologie erkennen lässt. Werden hingegen statt der Bindungswinkel die Bindungslängen verändert, so lässt sich der Einfluss von uniaxialen Druck auf das Graphengitter simulieren. Dazu setzt man für das Transferintegral, welches die Tunnelfrequenz der Elektronen zwischen benachbarten Kohlenstoffatomen bestimmt, veränderte Werte ein. Bild 2 zeigt den Energieplot eines Graphen-Gitters mit 120° -Winkeln, aber mit unterschiedlichen Werten für das Transferintegral. Durch uniaxialen Druck ergibt sich also eine spektrale Anisotropie, die sogar zu einer Energielücke am Dirac-Punkt führen kann.

Im starken äußeren Magnetfeld gruppieren sich die elektronischen Zustände zu Landau-Bändern zusammen, die durch Welligkeit und Unebenheiten auf der Graphenschicht verbreitert werden. Dieser Unordnungseffekt lässt sich theoretisch durch ein schwaches zusätzliches, räumlich zufälliges Magnetfeld beschreiben. Dabei hat sich gezeigt, dass das Leitfähigkeitsmaximum am Dirac-Punkt mit zunehmender Unordnung aufspaltet und die Aufspaltung von der Quadratwurzel des von außen angelegten Magnetfeldes abhängt. Derzeit wird geprüft, ob dieser theoretisch berechnete Effekt die im Experiment beobachtete Aufspaltung des Leitfähigkeitsmaximums erklären kann.

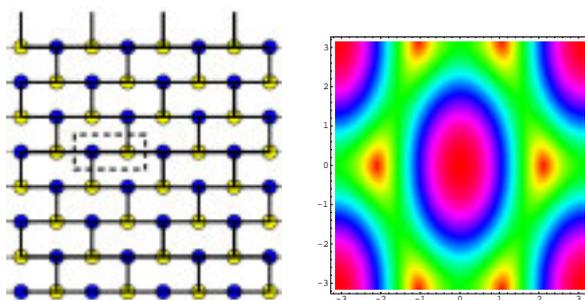


Bild 1: Das Mauerwerksgitter mit zwei Atomen pro Einheitszelle (links) sowie der Energie-Konturplot des Leitungsbandes (rechts)

Figure 1: The bricklayer lattice with two atoms per unit cell (left) as well as the energy contour plot of the conductance band (right)

values are entered for the transfer integral, which determines the tunnel frequency of the electrons between adjacent carbon atoms. Figure 2 shows the energy plot of a graphene lattice with angles of 120° , but with different values for the transfer integral. Uniaxial pressure thus causes spectral anisotropy which may even lead to an energy gap at the Dirac point.

In the strong external magnetic field, the electronic states group together to form Landau bands which are broadened by ripples and unevenness on the graphene layer. Theoretically, this disorder effect can be described by a weak additional, spatially random magnetic field. In this connection it has been shown that the conductivity maximum at the Dirac point splits up with increasing disorder and that splitting depends on the square root of the externally applied magnetic field. At present it is being tested whether this theoretically calculated effect can explain the splitting of the conductivity maximum observed in the experiment.

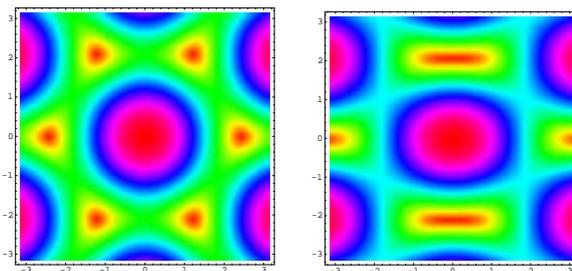


Bild 2: Der Energie-Konturplot eines normalen hexagonalen Gitters (links) sowie bei vergrößertem Transferintegral aufgrund uniaxialen Drucks (rechts)

Figure 2: The energy contour plot of a normal hexagonal lattice (left), and in the case of the transfer integral being enlarged due to uniaxial pressure (right)

Quantenpunkte und Quantenringe: Studien im Rahmen der funktionalen Renormierungsgruppe.

Neben dem zweidimensionalen Elektronengas mit metrologischer Anwendung beim Quanten-Hall-Effekt sind auch null-dimensionale (Quantenpunkte) und eindimensionale (Quantenringe) Systeme gleichermaßen von fundamentalem und anwendungsorientiertem Interesse. Quantenringe zeigen die typische Vielfalt der Physik von eindimensionalen Systemen: In bestimmten Parameterbereichen verhalten sie sich wie Luttinger-Flüssigkeiten und unterscheiden sich damit entscheidend von gewöhnlichen Metallen und Halbleitern. Mesoskopische Quantenringe (typische Dimensionen sind einige 100 Mikrometer) können aufgrund von Kohärenzeffekten Dauerströme tragen, also Ströme, die keinen elektrischen Widerstand spüren. Selbst in Anwesenheit von Störstellen verschwindet der Strom nicht, allerdings gibt es eine charakteristische Abhängigkeit des Dauerstromes von der Größe des Ringes. Wird der Ring größer, verschwindet der Dauerstrom typischerweise mit einem universellen Potenzgesetz.

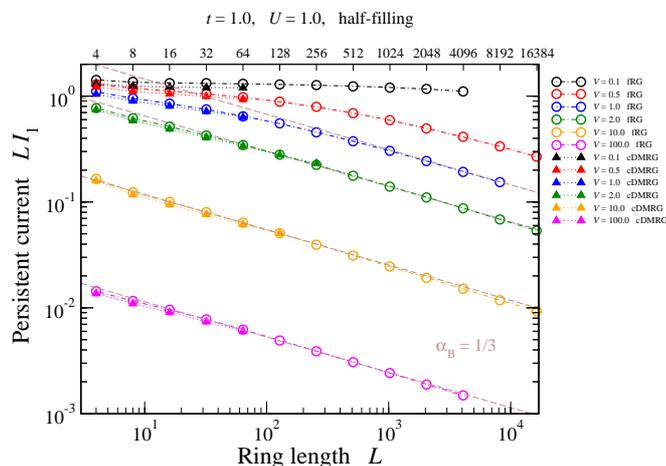
In Zusammenarbeit mit einer slowakischen Gruppe wird dieses Potenzgesetz genauer untersucht. Neben dem traditionellen Ansatz mit der Dichte-Matrix-Renormierungsgruppe (DMRG) kommt die funktionale Renormierungsgruppe (fRG) zum Einsatz, die zwar weniger genau ist, dafür aber auch weniger aufwendig, sodass größere Systeme, als sie der DMRG zugänglich sind, beschreibbar werden. Neue in der PTB entwickelte numerische Methoden erlauben es mittlerweile, Systeme von einigen tausend Gitterplätzen zu modellieren. Damit ist es nun möglich, das asymptotische (universelle) Verhalten der Dauerströme zu beschreiben.

Die erste Fourierkomponente des Dauerstromes, aufgetragen gegen die Systemgröße für einen Ring mit einer Störstelle der Stärke V .

Quantum Dots and Quantum Rings: A study using the functional Renormalization Group

In addition to the two-dimensional electron gas with metrological applications via the quantum Hall effect, zero-dimensional systems (quantum dots) and one-dimensional systems (quantum rings) are equally of fundamental and application-oriented interest. Quantum rings show the typical characteristics of one-dimensional systems: In specific parameter ranges, they behave like Luttinger liquids and, therefore, differ decisively from usual metals and semiconductors. Due to coherence effects, mesoscopic quantum rings (typical dimensions are a few 100 micrometers) may carry persistent currents, i.e. currents which do not perceive any electrical resistance. Even in the presence of defects, the current does not vanish. There is, however, a characteristic dependence of the persistent current on the size of the ring. If the ring becomes larger, the persistent current typically vanishes with a universal power law.

In cooperation with a Slovakian group, this power law is being investigated more thoroughly. In addition to the standard approach using the Density Matrix Renormalization Group (DMRG), the functional Renormalization Group (fRG) will be used which – although it is less precise than DMRG – requires less computing time and effort, so that systems larger than those being accessible to the DMRG become describable. New numerical methods recently developed in the PTB allow systems of a few thousand lattice sites to be calculated. In this way it is now possible to describe the asymptotic (universal) behaviour of the persistent currents.



The first Fourier component of the persistent current, plotted against the system size for a ring with a defect of strength V .

Die 59. Sitzung des Kuratoriums der PTB

Das Kuratorium der PTB traf sich am 29. und 30. Mai 2008 zu seiner 59. Jahrestagung im Institut Berlin.

Die Tagung begann mit der Begrüßung der Kuratoren und Gäste durch Prof. Dr. Ernst O. Göbel, den Präsidenten der PTB. Im Anschluss besuchten die Teilnehmer ausgewählte Arbeitsgruppen und Messplätze aus den Abteilungen der PTB in Berlin.



Olaf Kosch (li.) erläutert – u. a. den Nobelpreisträgern Klaus von Klitzing (Mitte) und Theodor Hänsch (2.v.r.) – das Magnetic Marker Monitoring. Olaf Kosch (left) is explaining to the Nobel prize winners Klaus von Klitzing (centre) and Theodor Hänsch (2nd from right) magnetic marker monitoring.

Im traditionellen nachmittäglichen Kolloquium stellten drei Nachwuchswissenschaftler der PTB ihre aktuellen Forschungsarbeiten vor. Kathrin Friedrich berichtete zu dem Thema „Röntgenographische Bestimmung des Spannungstensors in Si-Chips“. Dr. Bernd Kästner referierte über „Halbleiter-Einzel-elektronentransistoren – ein neuer Weg zum Quantenstromnormal“. Den Schlussvortrag des Kolloquiums hielt Axel Wiegmann mit dem Thema „Mathematikbasierte Messverfahren zur Topographiebestimmung optischer Oberflächen“. Zum Ende des ersten Tages trafen die Kuratoren und Gäste mit Vertretern der Abteilungen zu Fachgesprächen zusammen.

Die Kuratoriumssitzung am 30. Mai 2008 wurde von Ministerialdirigent Detlef Dauke, den Präsidenten des Kuratoriums der PTB,

The 59th meeting of the Board of Consultants of the PTB

The Board of Consultants of the PTB met on 29th and 30th May 2008 at the Berlin Institute for its 59th annual meeting.

The meeting began with the greeting of the consultants and guests by Prof. Dr. Ernst O. Göbel, President of the PTB. Following this, the participants visited selected working groups and test stands from the divisions of PTB in Berlin.

In the traditional afternoon colloquium, three PTB junior scientists presented their current research work. Kathrin Friedrich reported on the subject “X-ray determination of the stress tensor in Si chips”. Dr. Bernd Kästner lectured on “Semi-conductor single electron transistors – a new path to the quantum current standard”. The concluding lecture of the colloquium was given by Axel Wiegmann on the subject “Mathematics-based metrology for the determination of optical surface topography”. At the end of the first day, the consultants and guests met with the representatives of the divisions for professional talks.



Besuch des Fachbereichs „Tiefemperaturthermodynamik und -technologie“
Visit to the Department "Low-temperature Thermodynamics and Technology"

The Board of Consultants meeting on 30th May 2008 was opened by Detlef Dauke, President of the Board of Consultants of the PTB. Dauke spoke on, among other things, the economic situation in Germany, the evaluation of the PTB (and departmental research in general) by the Science Council, as well as on the technology policy in the BMWi.



Teilnehmer an der 59. Sitzung des Kuratoriums

Participants in the 59th meeting of the Board of Consultants

Thereby, he congratulated the President of the PTB and all employees for the outstanding result of the evaluation and also emphasized in

particular the unique position of the PTB in Germany, which leads to competitive advantages for German industry.

The BMWi intends to promote having the departmental research facilities included within the scope of a possible "Wissenschaftsfreiheitsgesetz" (Scientific freedom law). Within the scope of this project, it would be possible to implement the personnel and budgetary reforms recommended by the Science Council. Furthermore, the intention is to avoid possible competitive disadvantages for the departmental research facilities. The present outstanding capability of the three scientific-technical federal institutes in the area of operations of the BMWi is also to be assured in future.

The revised form of the Units and Time Act (EinhZeitG) was successfully concluded. Dauke stressed the importance of the counseling and support by the PTB in the working out of the law and ordinance drafts in the field of legal metrology.

The PTB's procedure in the case of European networking is viewed by the BMWi as exemplary. Dauke assured the support of the BMWi for the advancement of the EMRP according to Article 169 and pointed out the successful participation of PTB in the two excellence clusters QUEST and NeuroCure.

In the course of these positive developments, the Board of Consultants presented two resolutions during the meeting. Therein, the Ministry is requested to implement the recommendations from the Science Council's evaluation report and to support PTB in its

eröffnet. Dauke sprach u. a. über die wirtschaftliche Situation in Deutschland, die Evaluation der PTB (und der Ressortforschung im Allgemeinen) durch den Wissenschaftsrat sowie über die Technologiepolitik im BMWi. Dabei gratulierte er dem Präsidenten der PTB und allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern zum hervorragenden Ergebnis der Evaluation und hob insbesondere die Alleinstellung der PTB in Deutschland hervor, die zu Wettbewerbsvorteilen der deutschen Industrie führe.

Das BMWi wolle sich dafür einsetzen, dass die Ressortforschungseinrichtungen in den Anwendungsbereich eines möglichen Wissenschaftsfreiheitsgesetzes aufgenommen werden. Im Rahmen dieses Vorhabens könnten die vom Wissenschaftsrat empfohlenen personal- und haushaltsrechtlichen Reformen umgesetzt werden. Darüber hinaus gelte es, mögliche Wettbewerbsnachteile für die Ressortforschungseinrichtungen zu vermeiden. Die derzeit hervorragende Leistungsfähigkeit der drei wissenschaftlich-technischen Bundesanstalten im Geschäftsbereich des BMWi solle auch zukünftig gesichert werden.

Dauke hob die erfolgreiche Neufassung des Einheiten- und Zeitgesetzes (EinhZeitG) hervor und betonte die Bedeutung von Beratung und Unterstützung durch die PTB bei der Erarbeitung von Gesetz- und Verordnungsentwürfen im Bereich des gesetzlichen Messwesens.

Das Vorgehen der PTB bei der europäischen Vernetzung wird im BMWi als beispielgebend angesehen. Dauke sicherte die Unterstützung des BMWi für die Förderung des EMRP nach

Artikel 169 zu und würdigt die erfolgreiche Teilnahme der PTB an den zwei Exzellenzclustern QUEST und NeuroCure.

Anlässlich dieser positiven Entwicklungen legte das Kuratorium in der Sitzung zwei Resolutionen vor. Darin wird das Ministerium aufgefordert, die Empfehlungen aus dem Evaluationsgutachten des Wissenschaftsrates umzusetzen und die PTB bei der Mitwirkung im Exzellenzcluster QUEST mit den erforderlichen Maßnahmen zu unterstützen.

Prof. Dr. Ernst O. Göbel bilanzierte in seinem Bericht die Ergebnisse der PTB. Schwerpunkte der Präsentation waren die Dienstleistungen der PTB, Experimente zur Neudefinition von Basiseinheiten, erfolgreiche Teilnahmen im Rahmen der Exzellenzinitiative, EMRP/ ERA-NET PLUS, Großprojekte (wie Glocker-Bau, Willy-Wien-Laboratorium und 7-Tesla-NMR), die Bilanz der Zielvereinbarungen zwischen PTB und BMWi 2003 bis 2007 und die Evaluation durch den Wissenschaftsrat.

Im weiteren Verlauf der Sitzung berichteten Dr. Sommer und Dr. Janßen anlässlich ihrer Berufung zu Abteilungsleitern über die Arbeiten der Abteilungen 3 bzw. 6.

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

Persönliches:

Als neue Mitglieder des Kuratoriums wurden Dipl. Phys. Veronika Martens und Prof. Dr. Olaf Dössel berufen.

Im Berichtsjahr schieden die Mitglieder Prof. Dr. sc. nat. Joachim P. Schoenes und Dr.-Ing. Peter-Maximilian Stehle aus dem Kuratorium aus.

Die Kuratoren informieren sich in der Halle des Hermann von Helmholtz-Baus über die Möglichkeiten der Energieeffizienzmessung bei Kraftwerken.

participation in the "QUEST" excellence cluster, with the necessary measures.

In his report Prof. Dr. Ernst O. Göbel took stock of PTB's work results. The main focal points of the presentation were the services of PTB, experiments for the redefinition of the base units, successful participation within the scope of the excellence initiative, EMRP/ ERA-NET PLUS, major projects (such as Glocker Building, Willy Wien Laboratory and 7-Tesla-NMR), the balance sheet of the target agreements between PTB and BMWi, 2003 to 2007, and the evaluation by the Science Council.

In the further course of the meeting, Dr. Sommer and Dr. Janßen reported on the work of Divisions 3 and 6 on the occasion of their assignment as heads of their divisions.

The Chairman of the Committee for the Extension of the Board of Consultants (Ausschuss zur Ergänzung des Kuratoriums), Prof. Dr. Klaus von Klitzing, reported on the previous day's meeting of the Committee, and the Treasurer of the Helmholtz-Fonds e. V., Ruprecht of Siemens, presented his report on the economic development of the Helmholtz-Fonds e. V.

Personal matters:

Dipl. Phys. Veronika Martens and Prof. Dr. Olaf Dössel were appointed as new members of the Board of Consultants.

In the year under report, the members Prof. Dr. sc. nat. Joachim P. Schoenes and Dr.-Ing. Peter-Maximilian Stehle have resigned from the Board of Consultants.

In the hall of the Hermann von Helmholtz Building, the consultants are provided with information on the possibilities of energy efficiency measurement at power plants.



Bestnoten für Forschung und Entwicklung in der PTB

Im September 2007 machte sich eine Bewertungsgruppe des Wissenschaftsrates, von der Bundesregierung mit der systematischen Evaluation der Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten der Ressortforschungseinrichtungen beauftragt, an den beiden Standorten Braunschweig und Berlin ein Bild von der PTB und formulierte auf der Grundlage dieses Besuches sowie der von der PTB vorgelegten Informationen einen Bewertungsbericht. Er wurde im Mai 2008 verabschiedet und ist über das Internet öffentlich zugänglich (www.wissenschaftsrat.de).

Insgesamt stellt der Wissenschaftsrat der PTB und ihrer metrologischen Forschung und Entwicklung ein äußerst positives Zeugnis aus – zur großen Freude von Mitarbeitern und Führung. So heißt es im Bericht: „In der PTB werden FuE-Arbeiten sowie wissenschaftsbasierte Dienstleistungen erbracht, die insgesamt von sehr guter, in Teilen von exzellenter Qualität sind. Die Bundesanstalt befindet sich wissenschaftlich und technisch in der vordersten Reihe der international führenden nationalen metrologischen Institute.“

Als Grundlage des „beachtlichen Leistungsprofils“ der PTB sieht der Wissenschaftsrat „die hohe Kompetenz und die sichtbare Motivation des wissenschaftlichen Personals, die exzellente Ausstattung der Bundesanstalt mit Forschungsinfrastruktur sowie ein überzeugendes FuE-Management“. Zugleich trage die Arbeit der PTB in erheblichem Maße zur wirtschaftlichen Wertschöpfung in Deutschland bei und ermögliche durch ihre Dienstleistungen („state of the art der Metrologie“) vor allem Industrieunternehmen einen klaren Wettbewerbsvorteil. „Die Bundesanstalt hat hinsichtlich Quantität und Qualität ihrer wissenschaftsbasierten Dienstleistungen in Deutschland und Europa eine Alleinstellung. Dies gilt insbesondere für die Dienstleistungen im Bereich der Kalibrierung, die von großer Bedeutung für die Industrie und den Handel sind. Um die wirtschaftliche Entwicklung und die Innovationsprozesse in Deutschland deutlicher zu unterstützen, empfiehlt der Wissenschaftsrat allerdings auch, dass sich die PTB „stärker als bisher in Diskussionen um mögliche Zukunftsfelder einbringt“, womit gleichzeitig eine intensivere Politik-

Highest marks for research and development at the PTB

In September 2007, an assessment group of the Science Council, which is commissioned by the Federal Government with the systematic evaluation of the research and development work of the departmental research institutes at the two sites, Braunschweig and Berlin, formed an opinion of the PTB and formulated an evaluation report on the basis of this visit as well as on the information provided by the PTB. This report was adopted in May 2008 and is accessible to the public via the Internet (www.wissenschaftsrat.de).

All in all, the Science Council issues an extremely positive report on the PTB and its metrological research and development – to the great joy of staff members and management. Thus, the report states: “At the PTB, the R&D work accomplished as well as the science-based services rendered are overall of very good, in part, of excellent quality. The Federal Institute is scientifically and technically in the forefront of the internationally leading national metrology institutes”.

As the basis of the “considerable performance profile” of the PTB, the Science Council sees “the high degree of competence and the visible motivation of the scientific staff, the excellent resources of the Federal Institute with its research infrastructure as well as an impressive R&D management”. At the same time, the work of the PTB contributes considerably to the economic value creation in Germany and by its services enables (“state of the art metrology”), above all, industrial enterprises to have a clear competitive advantage. “The Federal Institute has a unique position in Germany and Europe with regard to the quantity and quality of its scientifically based services. This applies particularly to the services in the area of calibration, which are of great importance to industry and trade. In order to more clearly support the economic development and the innovative processes in Germany, the Science Council also recommends that the PTB “play a stronger part than hitherto in discussions about possible future fields”, whereby at the same time a more intensive policy advice in technological questions is addressed.

beratung in technologischen Fragen angesprochen ist.

Der Wissenschaftsrat betont mehrfach die herausgehobene Rolle der PTB innerhalb der deutschen, europäischen und internationalen Forschungsgemeinschaft sowie die wichtige Position der PTB im technologischen Netzwerk zwischen Forschung und Industrie. Als Basis dessen sieht der Wissenschaftsrat „das Selbstverständnis der PTB als wissenschaftlich unabhängige Einrichtung, die die Qualitätsmaßstäbe für ihre Arbeit zu einem großen Teil aus der akademischen Wissenschaft bezieht“. In diesem Zusammenhang begrüßt es der Wissenschaftsrat, „dass die PTB insgesamt eine hohe Autonomie bei der Organisation ihrer internen Abläufe sowie bei der Definition des Forschungsprogramms“ gegenüber dem BMWi besitzt. Zielvereinbarungen mit dem Ministerium und „leistungsfähige Verfahren der internen Aufgabenkritik“ sind hierfür die Grundlage.

Empfehlungen des Wissenschaftsrates beschränken sich auf einzelne Teilbereiche der PTB-Arbeit sowie haushaltstechnische Vorschläge zur weitergehenden Flexibilisierung des PTB-Budgets. Speziell hierzu sagt der Wissenschaftsrat auch: „Um weiterhin ihre sehr gute Position im internationalen Wettbewerb mit den USA und dem asiatischen Raum behaupten zu können, muss das Budget der PTB gezielt erhöht werden.“ Weiterhin empfiehlt der Wissenschaftsrat mit Nachdruck, die PTB von den gesetzlichen Stelleneinsparungen auszunehmen. Die Umsetzbarkeit dieser Empfehlungen werden zur Zeit von

The Science Council repeatedly emphasizes the outstanding role of the PTB within the German, European and international research community, and also the important position of the PTB in the technological network between research and industry. As the basis for this, the Science Council sees the “self-concept of the PTB as a scientifically independent institute which obtains the standards of quality for its work to a large extent from academic science”. In this connection, the Science Council appreciates “that the PTB has an overall high degree of autonomy in the organization of its internal proceedings as well as in the definition of the research programme”, as compared with the BMWi. Target agreements with the Ministry and “capable procedures of the internal task review” are the basis for this.

The Science Council's recommendations are restricted to individual subareas of PTB work as well as budgetary proposals for further improved flexibility of the PTB budget. Particularly hereto, the Science Council also states: “In order to continue to maintain its very good position in international competition with the USA and the Asian Region, the budget of the PTB must be systematically increased”. Furthermore, the Science Council emphatically recommends that the PTB be exempt from the legal post reductions. The feasibility of these recommendations is currently being explored by the PTB, together with the BMWi. In this connection, the Science Council requests the Ministry to report on the realization of the recommendations within three years at the latest.



Die Evaluations-Kommission

The evaluation commission

der PTB gemeinsam mit dem BMWi ausgelotet. Hierzu bittet der Wissenschaftsrat das Ministerium, spätestens in drei Jahren über die Umsetzung der Empfehlungen zu berichten.

Metrologische Forschung im europäischen Verbund

Der Startschuss für das gemeinsame europäische Metrologieforschungsprogramm EMRP (European Metrology Research Programme) der nationalen Metrologieinstitute in Europa ist gefallen. Die Europäische Kommission fördert 21 gemeinsame Forschungsprojekte mit Laufzeiten von drei Jahren im Rahmen einer ERA-NET PLUS-Maßnahme. Von dem Gesamtvolumen, das in der Summe aller Forschungsprojekte 64 Millionen Euro beträgt, übernimmt die EU-Kommission rund ein Drittel. Die übrigen Mittel werden von den nationalen Forschungspartnern aus insgesamt 20 europäischen Staaten getragen. Die PTB ist an insgesamt 20 der 21 Forschungsprojekte beteiligt und übernimmt bei sieben dieser Projekte die Rolle des Koordinators.

Diese 21 Projekte decken mit metrologischen Themen aus den Bereichen „SI-Einheiten und Fundamentalkonstanten“, „Gesundheit“, „Elektromagnetismus“ sowie „Dimensionelle Metrologie“ einen Teil des EMRP ab. Das umfassendere gesamte EMRP wurde Ende des Jahres von der Europäischen Kommission als Vorschlag für ein Programm im Rahmen des Artikels 169 des EG-Vertrages dem Europäischen Parlament und dem Ministerrat vorgelegt. Das für diese Maßnahme vorgeschlagte Forschungsvolumen beläuft sich auf rund 400 Mio. Euro für eine Programmlaufzeit von sieben Jahre und würde – im Erfolgsfall – zu 50 % aus EU-Mitteln finanziert werden. Mit einer Entscheidung von Europäischem Parlament und Ministerrat ist Mitte 2009 zu rechnen.

Mit dem EMRP nach ERA-NET PLUS und nach Artikel 169 dringt die europäische Metrologieforschung bezüglich Finanzierungsvolumen und Tiefe der Kooperation und Koordinierung in eine neue Dimension vor. Hinzu kommt, und auch dies ist neu, dass bei europäischer Kofinanzierung die fachlich-strategische Planung, das Projekt-Ausschreibungs- und Begutachtungsverfahren wie auch die

Metrological Research in a joint European cooperation

The starting signal has been given for the joint European Metrology Research Programme EMRP (European Metrology Research Programme) of the national metrology institutes in Europe. The European Commission is promoting 21 joint research projects with a running time of three years within the scope of an ERA-NET PLUS measure. Of the total volume amounting to 64 million euros for all research projects, the EU Commission is covering approximately one third. The remaining funds are carried by the national research partners from a total of 20 European states. The PTB is participating in a total of 20 of the 21 research projects and is assuming the role of coordinator in seven of these projects.

With metrological subjects from the fields of the “SI Units and Fundamental Constants”, “Health”, “Electromagnetism” as well as “Dimensional Metrology”, these 21 projects cover a part of the EMRP. The more comprehensive, total EMRP was presented at the end of the year by the European Commission as a recommendation for a programme within the scope of Article 169 of the EC Treaty to the European Parliament and the Council of Ministers. The research volume projected for this measure amounts to approx. 400 million euros for a programme running time of seven years, and 50 % would – in case of success – be financed by EU funds. A decision by the European Parliament and Council of Ministers is expected in mid 2009.

With the EMRP, according to ERA-NET PLUS and according to Article 169, European metrology research is entering a new dimension with regard to financing volume and the depth of the cooperation and coordination. In addition – and this, too, is new – in the case of European co-financing, the technical-strategic planning, the project bidding process and appraisal procedure as well as the execution lies in the hands of the metrology institutes.

The new Units and Time Act

On 13 July 2008, the Bundestag (German Federal Parliament) approved the draft of the new Units and Time Act (EinhZeitG). Two essential changes were implemented herewith: Firstly, the previous Units Act and the

Durchführung in den Händen der Metrologieinstitute liegen.

Das neue Einheiten- und Zeitgesetz

Am 13. Juli 2008 stimmte der Bundestag dem Entwurf des neuen Einheiten- und Zeitgesetzes (EinhZeitG) zu. Zwei wesentliche Änderungen sind hiermit umgesetzt worden: Zum einen sind das bisherige Einheitengesetz und das Zeitgesetz in einem einzigen Gesetz zusammengeführt worden, so dass nun mit der Transferierung der Zuständigkeit für die gesetzliche Zeit vom Bundesministerium des Innern (Bmi) zum BMWi beide metrologische Bereiche unter einem Dach vereint sind. Zum anderen schafft das neue Gesetz eine klarere und umfassendere gesetzliche Grundlage für die Aufgaben der PTB. Es fasst Aufgaben zusammen, die bisher im Einheitengesetz und im Eichgesetz beschrieben waren, und erweitert diese, um die Wirklichkeit der PTB als nationales Metrologieinstitut abzubilden: Forschung und Entwicklung sind nun ebenso wie der Wissens- und Technologietransfer explizit als Teil des fachlichen Auftrags der PTB genannt. Ferner sind die Zuständigkeit für die Einheitlichkeit bei der Weitergabe der Einheiten und die Regelung der Gebühren, die von der PTB für Leistungen etwa im Bereich der Zulassungen und Kalibrierungen erhoben werden, beschrieben. Das Gesetz legt damit konsequent die gesamte „Wertschöpfungskette“ von der Grundlagenforschung zu den Einheiten bis zu deren Nutzung beim „Kunden“ konsequent in den Verantwortungsbereich der PTB.

Time Act were combined into one single law, so that now with the transfer of the responsibility for legal time from the Federal Ministry of the Interior to the BMWi, both metrological fields are combined under one roof. Secondly, the new law provides a clearer and more comprehensive legal basis for the tasks of PTB. It combines tasks which had previously been specified in the Units Act and in the Weights and Measures Act and broadens them in order to map the reality of the PTB as a national metrology institute: Research and development are now just as explicitly stated as a part of the technical task of PTB as are knowledge transfer and technology transfer. Furthermore, the responsibility for the uniformity in the case of the dissemination of the units and the regulation of fees which PTB charges for services, for example in the area of approvals and calibrations, are specified. Thus, the law places the entire “value-added chain”, from fundamental research, to the units, and to their use for the “customer”, consistently in the area of responsibility of the PTB.

Successful start for International Graduate School of Metrology

In 2007, the PTB and the Technical University of Braunschweig together launched the Braunschweig International Graduate School of Metrology (IGSM) – with the aim of concentrating the diverse activities of TU and PTB for the education of doctoral candidates in the broad field of metrology. In addition to the research work in the laboratory, there are joint English-language lectures and seminars

Teilnehmer der International Graduate School of Metrology

Participants of the International Graduate School of Metrology



Internationale Graduiertenschule für Metrologie erfolgreich gestartet

Die PTB und die Technische Universität Braunschweig haben 2007 gemeinsam die Braunschweig International Graduate School of Metrology (IGSM) ins Leben gerufen – mit dem Ziel, die vielfältigen Aktivitäten von TU und PTB bei der Ausbildung von Doktoranden und Doktorandinnen auf dem weiten Feld der Metrologie zu bündeln. Neben der Forschungsarbeit im Labor stehen für die Studierenden unter anderem gemeinsame englischsprachige Vorlesungen und Seminare sowie Industriepraktika auf dem Programm.

Dank der finanziellen Unterstützung durch das Land Niedersachsen sind neben den Mitteln für die Geschäftsstelle Reisemittel für Konferenzbesuche der Studierenden verfügbar. Auch konnten mittlerweile die ersten Vollstipendien aus diesen Mitteln an Bewerber aus aller Welt vergeben werden, ausgewählt aus über 150 Bewerbungen. Den Abschluss des akademischen Jahres 2007/2008 bildete eine knapp einwöchige Sommerschule, auf der hochrangige Expertinnen und Experten aus Wissenschaft und Industrie in zwangloser Atmosphäre über Schlüsselthemen der Metrologie – von der Bestimmung von Naturkonstanten über die präzise chemische Analytik bis zur Vermessung industrieller Präzisionswerkstücke – Vorlesungen hielten und mit den Studierenden diskutierten. Gruppenarbeit und Poster-Präsentationen der studentischen Forschungsprojekte haben mit dazu beitragen, die Zusammenarbeit der Mitglieder der IGSM zu stärken.

Der Zwischenbericht über das erste Jahr der IGSM hat das Land Niedersachsen veranlasst, für die nächsten vier Jahre die weitere finanzielle Förderung der IGSM zuzusagen.

as well as practical internships, among other things, on the programme for the students.

Thanks to the financial support by the federal state of Lower Saxony, there are available, in addition to the office funds, travel funds for the students to attend conferences. Also, meanwhile it was possible to grant the first full scholarships from these funds to applicants all over the world – selected from more than 150 applications. The academic year 2007/2008 was concluded with an almost one-week summer school, at which high-ranking experts from science and industry held lectures and discussions with students on key metrological subjects in an informal atmosphere – from the determination of natural constants, to precise chemical analysis, and to the measurement of industrial precision workpieces. Group work and poster presentations of the students' research projects contributed to strengthening the cooperation between the members of the IGSM.

The interim report on the first year of the IGSM prompted the federal state of Lower Saxony to provide the funding of the IGSM for the next four years.

Koordination mit der Gemeinsamen Forschungsstelle der EU

Die Europäische Kommission unterhält mit dem Generaldirektorat „Gemeinsame Forschungsstelle“ eine eigene Infrastruktur zur wissenschaftlichen Politikberatung auf wichtigen Feldern der Gemeinschaftspolitik. Dabei berühren die Arbeiten seiner sieben über das Gebiet der EU verteilten Forschungsanstalten zum Teil auch die Metrologie, die in Europa durch EURAMET e.V., den Zusammenschluss von 27 europäischen nationalen Metrologieinstituten, vertreten wird. Der Leiter des Generaldirektorats, Dr. Roland Schenkel, besuchte am 6. Juni 2008 die PTB, wo auch das Sekretariat von EURAMET angesiedelt ist. Dabei konnte er sich umfassend über die Aufgaben und Möglichkeiten der PTB und von EURAMET informieren. Insbesondere wurden Fragen einer möglichen Kooperation und Koordination diskutiert. Das Programm wurde komplettiert durch einen Rundgang durch ausgewählte Laboratorien der PTB.

Coordination with the Joint Research Centre of the EU

With the Directorate-General “Joint Research Centre”, the European Commission supports its own infrastructure for the scientific policy advisory services in important areas of Community policies. Thereby, the work of its seven research institutes, distributed over the area of the EU, also in part affects metrology which is represented in Europe by EURAMET e.V. – the association of 27 European national metrology institutes. On 6th June, the head of the Directorate-General, Dr. Roland Schenkel, visited PTB, where also the secretariat of EURAMET is located. Thereby, it was possible for him to obtain comprehensive information on the tasks and possibilities of PTB and EURAMET. Particularly, questions concerning a possible cooperation and coordination were discussed. The programme was completed by a tour through selected PTB laboratories.

Dr. Roland Schenkel (re.) bei seinem Laboratoriumsrundgang in der PTB. Dr. Robert Wynands (li.) erläutert Physik und Technik der Atomuhren.

Dr. Roland Schenkel (right) on his laboratory tour in PTB. Dr. Robert Wynands (left) explaining the physics and technology of atomic clocks.



Qualitätsmanagement

Die messtechnische Rückführung auf die SI-Einheiten und damit auch die klassische Darstellung und Weitergabe der SI-Einheiten spielt unverändert eine zentrale Rolle. Dies wurde auch durch das neue Gesetz über Einheiten im Messwesen und die Zeitbestimmung vom 3. Juli 2008 (BGBl. I S. 1185) unterstrichen. Die Sicherung der internationalen Vergleichbarkeit gehört daher unverändert zu den Kernaufgaben der PTB. Hierfür ist der dauerhafte und wirksame Betrieb eines Qualitätsmanagementsystems Voraussetzung.

Die Verbesserung und Anpassung des Qualitätsmanagements der PTB an die nationalen und internationalen Anforderungen wurde systematisch fortgesetzt. Die Ergebnisse von Audits, die Anregungen und Verbesserungsvorschläge sowie die Rückmeldungen von Kunden und Partnern wurden in den Abteilungen und Stellen direkt umgesetzt oder durch das zentrale Qualitätsmanagement aufgegriffen und in die metrologische Praxis überführt. Durch ein international vereinbartes jährliches Evaluierungsverfahren wurde die Wirksamkeit des Qualitätsmanagements im Rahmen des CIPM-MRA erfolgreich nachgewiesen.

In allen externen Bewertungsprozessen wurde der PTB eine sehr gute, in Teilen sogar exzellente Kompetenz und Qualität ihrer wissenschaftsbasierten Dienstleistungen bestätigt.

Um das Vertrauen in die internationalen Bewertungsverfahren zu unterstützen, wurde ein spezielles Projekt innerhalb von EURAMET vereinbart, das die Zusammenarbeit bei Evaluierung, Entwicklung und Verbesserung der QM-Systeme der deutschsprachigen nationalen Metrologieinstitute im Rahmen des D-A-CH auf eine neue Stufe hebt.

Darüber hinaus konnte das Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit (BVL) zur Mitarbeit im Rahmen des CIPM-MRA gewonnen werden. Wegen der Komplexität der Aufgaben und Methoden in der Metrologie der Chemie werden auch die Fragestellungen zum Qualitätsmanagement in einem nationalen Netzwerk, bestehend aus BAM, UBA und BVL, von der PTB koordiniert.

Quality management

The metrological traceability to the SI units – and thus also the classical realization and dissemination of the SI units – play an unaltered central role. This was also underlined in the new law on units in metrology and the determination of time of 3rd July 2008 (BGBl. I [Federal Law Gazette I], page 1185). The safeguarding of international comparability thus belongs unaltered to the core tasks of the PTB. Therefore, the durable and effective operation of a quality management system is a precondition.

The upgrading and adaptation of the PTB's Quality Management to the national and international requirements was systematically continued. The results of audits, the suggestions and ideas for improvement as well as the feedback from customers and partners were directly implemented in the divisions and bodies or acted upon by the central Quality Management and converted to metrological practice. By means of an internationally agreed upon annual evaluation procedure, the effectiveness of the quality management was successfully proven within the scope of the CIPM-MRA.

In all external review processes, the very good, in part excellent, competence and quality of PTB's scientifically based services was confirmed.

To endorse confidence in the international review procedure, a special project within EURAMET was agreed upon that upgrades the cooperation in the evaluation, development and improvement of the QM systems of the German-speaking national metrology institutes within the scope of the D-A-CH.

Furthermore, it was possible to enlist the cooperation of the Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit (BVL) (Federal Office of Consumer Protection and Food Safety) within the scope of the CIPM-MRA. Due to the complexity of the tasks and methods in the metrology of chemistry, also the questions about quality management are coordinated by the PTB in a national network consisting of BAM, UBA and BVL.

Innovations- und Patentverbund zur Förderung durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) empfohlen

Gemeinsam mit dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) und der Technischen Universität Braunschweig ist die PTB im Rahmen des Innovations- und Patentverbundes (IPV) für die Projektförderung zum Thema "Neue Strategien der Patentverwertung" empfohlen worden. Damit soll der integrierte Ansatz der erfindernahen und institutsübergreifenden Vermarktung von Technologiepaketen des Innovations- und Patentverbundes weiter gestärkt werden.

Der Innovations- und Patentverbund wurde im September 2007 mit dem Ziel einer erfindernahen Herangehensweise an die Patentverwertung gegründet. Der neue Ansatz besteht insbesondere aus den vier Schritten:

1. Verwertung von Technologiepaketen statt reiner Patentverwertung
2. horizontale, ineinander greifende Zusammenarbeit
3. Nutzung unmittelbarer Erfindernähe zum Technologietransfer
4. umfassendes Dienstleistungsangebot zum Kundennutzen

Aus allen Instituten führen Innovationsmanager unter Anleitung der Technologiebeauftragten geeignete Technologien zusammen. Da die Institutionen schwerpunktmäßig in unterschiedlichen Branchen tätig sind, ist diejenige Institution, die die besten Branchenkenntnisse besitzt, für die abschließende Verwertung zuständig.

Ausgehend von gemeinsamen Technologieentwicklungen in den Bereichen Messtechnik, Mobilität, Produktionstechniken und Informationstechnologie sind gemeinsame Messeauftritte und Veranstaltungen geplant.

Die Förderung ist Teil des seit April 2008 neu aufgestellten Programms SIGNO, mit dem das BMWi kleine und mittlere Unternehmen (KMU), Hochschulen und Forschungseinrichtungen bei der Verwertung ihres geistigen Eigentums unterstützt. Der Projektstart ist für den 1. Januar 2009 geplant.

Federal Ministry of Economics and Technology (BMWi) recommends Innovation and Patent Association for funding

Together with the German Aerospace Centre (DLR) and Braunschweig Technical University the PTB has, within the framework of the Innovation and Patent Association Braunschweig (IPV), been recommended for project funding (name of the project: "New Strategies of Patent Exploitation"). With this, the integrated approach of marketing technology packages in close cooperation with the inventor and across different institutions is to be further strengthened.

The Innovation and Patent Association Braunschweig was founded in September 2007 with the aim of exploiting patents in an "inventor-friendly" way. The new approach comprises four steps in particular:

1. Exploitation of whole technology packages instead of pure patent exploitation
2. horizontal and intertwined cooperation
3. direct involvement of the inventor in the technology transfer
4. offering further services to customers.

From all the institutions, suitable technologies will be brought together under the guidance of the pertinent Technology Transfer Office. As the institutions work in different scientific and technological sectors focusing on different areas, the institution which will ultimately be responsible for the final exploitation will be the institution having the best knowledge of that particular field of application.

Because of joint technology developments in the fields of metrology, mobility, production technology and information technology, joint appearances at trade fairs and events are planned.

The funding will be part of the newly set-up SIGNO Programme running since April 2008, with which the BMWi supports small and medium-sized enterprises (SMEs), universities and research institutes in exploiting their intellectual property. The project start is planned for 1 January 2009.

PTB-Zertifizierungsstellen fusionieren zu einer Zertifizierungsstelle

Die PTB stellt jährlich über 2000 Zertifikate aus und führt damit Konformitätsbewertungen im Rahmen unterschiedlicher Zertifizierungssysteme durch. Die Verantwortung für diese Tätigkeiten war bislang auf verschiedene Fachabteilungen und drei getrennte Zertifizierungsstellen verteilt. Diese Zertifizierungsstellen wurden am 1.10.2008 zu einer Zertifizierungsstelle zusammengefasst.

Die neue Zertifizierungsstelle wurde als horizontale Einheit eingerichtet, die sich über alle Fachabteilungen der PTB erstreckt, in denen die den Konformitätsbewertungen zugrunde liegenden Produktprüfungen durchgeführt werden. Das Aufgabengebiet der Zertifizierungsstelle umfasst Konformitätsbewertungen nach folgenden Zertifizierungssystemen:

- Konformitätsbewertungen (in erster Linie Baumusterprüfungen und QM-Anerkennungen) als Benannte Stelle Nr. 0102 nach europäischen Richtlinien des New Approach 94/9/EG (Explosionsschutz), 90/384/EWG (nichtseltsttätige Waagen) und 2004/22/EG (Messgeräte)
- Konformitätsbewertungen im Rahmen des IECEx Scheme nach den IECEx Rules
- Bauartprüfungen von Messgeräten im Rahmen des OIML- Zertifizierungssystems nach OIML B 3
- EWG-Zulassungen von Messgeräten auf Grundlage der Rahmenrichtlinie 71/316/ EWG
- Bauartzulassungen von Messgeräten nach dem Gesetz über das Mess- und Eichwesen (Eichgesetz)
- Bauartprüfungen von Messgeräten und Komponenten von Messgeräten nach anerkannten Regeln der Technik.

Zur Durchführung der Konformitätsbewertungsverfahren stehen der Zertifizierungsstelle mehr als 100 gelistete Bewerter und Zertifizierer in den Fachabteilungen der PTB zur Verfügung. Diese werden noch durch ca. 40 interne und externe Auditoren bzw. Fachexperten ergänzt, die auftragsbezogen für die Anerkennung und Überwachung von Hersteller-QM-Systemen eingesetzt werden.

PTB certification bodies merge into a single body

Every year, PTB issues more than 2,000 certificates and thereby carries out conformity assessments within the scope of different certification systems. The responsibility for these activities had so far been distributed among various specialized departments and three separate certification bodies. These were merged into one single certification body on 1 October 2008.

The new certification body was set up as a "horizontal" unit which encompasses all PTB departments in which products are tested for the purpose of conformity assessments. The tasks of the certification body include conformity assessments according to the following certification systems:

- Conformity assessments (mainly type examinations and QM approvals) in its capacity as Notified Body No. 0102 in accordance with the European Directives of the New Approach 94/9/EC (ATEX), 90/384/EEC (non-automatic weighing instruments) and 2004/22/EC (MID)
- Conformity assessments within the scope of the IECEx scheme according to the IECEx rules
- Type examination certificates of measuring instruments within the scope of the OIML certification system according to OIML B 3
- EEC approvals of measuring instruments based on the Framework Directive 71/316/EEC
- Type examination certificates of measuring instruments in accordance with the Verification Act
- Test certificates of measuring instruments and components of measuring instruments according to the accepted rules.

For the realization of these conformity assessment procedures, more than 100 listed evaluators and certifiers are available in PTB's different specialized departments. This team is completed by approx. 40 internal and external auditors or technical experts who – depending on the orders – are assigned tasks of approval and surveillance of manufacturers' QM systems.

Die Zertifizierungsstelle gliedert sich organisatorisch in 5 Sektoren:

- Sektor 1: Explosionsschutz
- Sektor 2: Waagen und dimensionelle Messgeräte
- Sektor 3: Durchfluss- und Mengemessgeräte
- Sektor 4: Elektrische Energiemesstechnik
- Sektor 5: Spezielle Messgeräte

Der Leiter der Zertifizierungsstelle und die Sektorleiter bilden den Zertifizierungsausschuss, in dem die Konformitätsbewertungstätigkeiten koordiniert und grundlegende Entscheidungen abgestimmt werden.

Die eigentlichen Konformitätsbewertungsverfahren erfolgen in Zusammenarbeit von Zertifizierern und Bewertern, die den jeweiligen Sektoren zugeordnet sind.

Die Zertifizierungsstelle betreibt ein QM-System, das als integraler Bestandteil des QM-Systems der PTB den Anforderungen an Zertifizierungsstellen für Produkte nach DIN EN 45011 und für Managementsysteme nach DIN EN ISO/IEC 17021 entspricht. Dadurch wird die PTB, im Zusammenhang mit der Erfüllung der Anforderungen der DIN EN ISO/IEC 17025 durch die Fachabteilungen, in denen die den Konformitätsbewertungen zugrunde liegenden Produktprüfungen durchgeführt werden, den von der Europäischen Union gestellten Anforderungen an notifizierte Stellen gerecht.

From an organizational point of view, the certification body is divided into 5 sectors:

- Sector 1: Explosion protection
- Sector 2: Weighing instruments and dimensional measuring instruments
- Sector 3: Flow and volume measuring instruments
- Sector 4: Electric energy measuring techniques
- Sector 5: Special measuring instruments

The head of the certification body and the heads of the different sectors form the Certification Committee in which the conformity assessment tasks are coordinated and fundamental decisions are agreed among each other.

The actual conformity assessment processes are carried out jointly by certifiers and evaluators who are assigned to the corresponding sectors.

The certification body operates a QM system which – as an integral part of PTB's QM system – fulfils the requirements placed on certification bodies for products according to EN 45011 and on management systems according to ISO/IEC 17021. The PTB departments entrusted with product testing for the purposes of conformity assessment fulfil the provisions of ISO/IEC 17025. Thus PTB meets the requirements placed by the European Union on notified bodies.

Ein neuer Impuls für die gemeinsame Forschung mit Russland

Im September 2008 reiste eine siebenköpfige Delegation der PTB unter Leitung von Prof. Dr. Ernst O. Göbel nach Moskau, um ein mehrjähriges Programm zwischen russischen Metrologieinstituten und der PTB über die wissenschaftlich-technische Zusammenarbeit zu beschließen. Prof. Dr. Göbel und Dr. Krutikov vom Rostechregulirovanie unterzeichneten eine Rahmenvereinbarung sowie ein dazu gehöriges Kooperationsprogramm. Aufbauend auf den seit geraumer Zeit bestehenden guten Beziehungen zwischen der PTB und den russischen Metrologieinstituten soll nun die gemeinsame Arbeit an rund 40 verschiedenen Einzelthemen aufgenommen und intensiviert werden. Dazu gehören kurzfristige wissenschaftlich-technische Kooperationen und mittel- bis langfristige Forschungs-kooperationen auch auf Zukunftsfeldern wie Terahertz-Metrologie und Nanotechnologie.

Bei der Erarbeitung der Rahmenvereinbarung wurden alle bestehenden und geplanten Kooperationen erörtert. Der Inhalt des Programms wird jährlich aktualisiert und, wenn nötig, ergänzt. Der Kooperationsvertrag stellt einen Meilenstein in der wissenschaftlich-technischen Zusammenarbeit mit Russland dar. Er wird die gemeinsame Forschungsarbeit erleichtern und auch Grundlage für mittel- und langfristige Forschungsvorhaben sein.

Brasilien gibt metrologisches Know-how an Mosambik weiter

Die weltpolitischen Entwicklungen und die wachsenden Herausforderungen zur Lösung globaler Fragen haben die zentrale Rolle einer Gruppe von Ländern verdeutlicht. Diese Länder werden vom Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (BMZ) als Ankerländer bezeichnet. Sie spielen insbesondere auf der Grundlage

Prof. Dr. Ernst O. Göbel und Dr. Vladimir N. Krutikov, Vizepräsident vom Rostechregulirovanie bei der Unterzeichnung des Kooperationsvertrages im September 2008

Prof. Dr. Ernst O. Göbel and Dr. Vladimir N. Krutikov, Vice-President of Rostechregulirovanie, at the signing of the cooperation agreement in September 2008

A new impulse for joint research with Russia

In September 2008, a seven-strong delegation from the PTB, led by Prof. Dr. Ernst O. Göbel, travelled to Moscow to finalize a programme running for several years on scientific and technical cooperation between Russian metrology institutes and the PTB. Prof. Dr. Göbel and Dr. Krutikov of Rostechregulirovanie signed a framework agreement as well as a related programme of cooperation. Building on the good relationship between the PTB and the Russian metrology institutes which has existed for a considerable time, joint work on around 40 different individual topics is to be taken up and intensified. This includes short term scientific and technical cooperations and medium to long term research cooperations also in terahertz metrology and nanotechnology.

While the framework agreement was being worked on, all the existing and planned cooperations were discussed. The content of the programme is to be up-dated annually and, if necessary, supplemented. The cooperation contract represents a milestone in scientific and technical cooperation with Russia. It will ease joint research work and also be a foundation for medium and long term research projects.

Brazil passes metrological know-how on to Mozambique

Global political developments and the growing challenge of solving global questions have made the central role of a group of countries clear. These countries are designated as anchor countries by the Federal Ministry for Economic Cooperation and Development



ihres wirtschaftlichen Gewichtes und des politischen Einflusses in ihren Regionen sowie global eine wachsende Rolle. Ihnen kommt bei der Bekämpfung menschlicher Armut, dem Streben nach einer global nachhaltigen Entwicklung, der Sicherung von Frieden und Stabilität sowie in Fragen der Good Governance und dem Schutz globaler öffentlicher Güter eine Schlüsselrolle zu. Die Volkswirtschaften der Ankerländer sind überwiegend äußerst vielschichtig. Sie besitzen neben ausgedehnten Armutsräumen auch industrielle Wachstumskerne, die zunehmend international wettbewerbsfähig sind. Daher ist Entwicklungszusammenarbeit nicht hinfällig, gleichzeitig bieten sich vielfältige Ansatzpunkte für eine Zusammenarbeit „auf Augenhöhe“ und Dreieckskooperationen.

Das INMETRO, das nationale metrologische Staatsinstitut Brasiliens und ehemaliger Projektpartner der Technischen Zusammenarbeit (TZ) der PTB, unterstützt das Staatsinstitut INNOQ in Mosambik beim Aufbau seiner nationalen Qualitätsinfrastruktur (QI) durch Bereitstellung von Fachexperten zur Aus- und Fortbildung und Beratung. Die PTB und die Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) begleiten diese Dreieckskooperation und bringen ihre Erfahrungen zur Erreichung nachhaltiger Erfolge und Wirkungen ein. Die Agência Brasileira de Cooperação (ABC) und das BMZ finanzieren die Maßnahmen.

Die Aufgabe der PTB bei dieser Dreieckskooperation ist es, die brasilianischen Projektpartner mit Rat und Tat zu unterstützen, für besondere Themen wie Organisationsentwicklung, Umsetzung und Nachhaltigkeit eigene Experten einzusetzen und Kontakte zu knüpfen, um die einzelnen Komponenten des Projektes zu stärken und zu überprüfen sowie die Erstellung der Projektberichte zu begleiten.

Die Dreieckskooperation nutzt einerseits die Nähe des gebenden Anker- bzw. Schwellenlandes Brasilien zum Entwicklungsland Mosambik (gleiche Sprache, ähnliche Geschichte, zeitlich versetzt), andererseits die unterschiedliche Entwicklung, die Erfahrungen und Fortschritte und die von Brasilien bereits gegangenen notwendigen Schritte vom Entwicklungs- zum Schwellenland.

(BMZ). They are playing a growing role in particular due to their economic weight and the political influence they exert in their region as well as globally. They have a key role in fighting poverty, striving for globally sustainable development, securing peace and stability as well as in questions of good governance and the protection of global, public goods. The economies of the anchor countries are predominantly extremely complex. Apart from the large areas suffering from poverty, they also have industrial centres of growth, which are becoming increasingly competitive at an international level. Development work is therefore not invalid, simultaneously various approaches to cooperation "at the same eye level" and trilateral cooperation present themselves.

The INMETRO, Brazil's national state metrology institute and a former project partner of the Technical Cooperation (TC) Department of the PTB, is supporting the state institute INNOQ in Mozambique in the setting up of its national quality infrastructure (QI) through making technical experts available for training, further education and consultancy. The PTB and the Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) are accompanying this trilateral cooperation and bringing in their experience to attain sustainable success and effectiveness. The Agência Brasileira de Cooperação (ABC) and BMZ are financing these measures.

The PTB's job in this trilateral cooperation is to support the Brazilian project partner with help and advice; to use, for special topics – such as organization development, implementation and sustainability – experts of its own and make contacts, in order to strengthen the individual components of the project and to check as well as accompany the drawing up of project reports.

The trilateral cooperation uses, on the one hand, the closeness of the donating anchor or newly industrialized country Brazil to the developing country Mozambique (both have the same language and a similar history, but in the case of Mozambique, developments started much later) and, on the other hand, the difference in development, the experience gained and progress made and the necessary steps already taken by Brazil from a developing to a newly industrialized country.

Familienfreundlicher Arbeitsplatz

Wer einen Beruf und einen Arbeitsplatz hat, kann sich freuen. Wer eine Familie mit Kindern hat, kann sich ebenfalls freuen. Wer aber beides hat und beides in seinem Alltag organisieren muss, hat in der Regel ein Problem. Denn die Lebenswirklichkeiten von Beruf und Familie passen nicht lückenlos aneinander. Die PTB hat dies seit langem erkannt und setzt auf eine möglichst familienbewusste Personalpolitik, zu der flexible Arbeitszeiten, maßgeschneiderte Teilzeit und Telearbeit gehören.

Diese Rahmenbedingungen sind sehr hilfreich, lösen aber nicht alle Probleme, die der Beruf-Familien-Alltag mit sich bringen kann. Was tun, wenn die Tagesmutter ausfällt oder die Kindertagesstätte für einen Tag geschlossen bleibt? Das Gleichstellungsteam der PTB hat hierzu konkrete Maßnahmen und Aktivitäten angestoßen, die im Einzelfall für die betroffenen Eltern sehr nützlich sein können. So wurden im vergangenen Jahr in der PTB in Braunschweig Ruhe- und Wickelräume ausgestattet, in Braunschweig und in Berlin wurde jeweils ein Eltern-Kind-Büro eingerichtet und innerhalb der gesamten PTB wurde die Möglichkeit eines Rooming-In eingeführt. Eltern können ihr Kind also im „Betreuungs-Notfall“ mit an den Arbeitsplatz bringen. Für den kurzfristigen Betreuungsbedarf steht dieses separate Büro zur Verfügung, das sowohl mit einem Computerarbeitsplatz als auch mit einer Spielecke ausgestattet ist.

Weitere Maßnahmen zur besseren Vereinbarkeit von Beruf und Familie sind für das Jahr 2009 geplant.

Family friendly work place

Those of us who have a job and a place to work can count ourselves lucky. Those of us who have a family with children can also count ourselves lucky. But those of us who have both and have to organize both on a daily basis, usually have a problem. This is because the reality of living with both a job and a family does not match up perfectly. The PTB has recognized this for a long time and applies a personnel policy that is as family conscious as possible, including flexible working hours, custom-made part-time jobs and teleworking.

These conditions are very helpful, but do not solve all the problems which the daily combination of working and family life can bring about. What do you do when your childminder cannot mind your child or the day care service is closed for a day? The women's team of the PTB has initiated concrete measures and activities for these cases, which can be very useful for the parents affected in individual cases. Last year, quiet rooms and nappy-changing facilities were set up in the PTB in Braunschweig, a parent-child office was furnished in both Braunschweig and Berlin and within the whole of the PTB, the possibility of "rooming-in" was introduced. Parents can thus take their child to work in a "child care emergency". This separate office is available for short term child care; it is fitted out with a computer and a working area as well as with a children's play corner.

Further measures to better combine work and family life are planned for 2009.



Paul – am Arbeitsplatz seiner Mutter

Paul – at his mother's workplace

Messen, Tagungen, Veranstaltungen

Stand das Jahr 2007 in Braunschweig noch ganz unter dem Motto „Stadt der Wissenschaft“ – mit zahllosen Veranstaltungen für ein breites Publikum –, so wendeten sich die von der Presse- und Öffentlichkeitsarbeit organisierten und begleiteten Veranstaltungen des Jahres 2008 eher einem jeweils speziellen Fachpublikum zu. Dabei umfasste das Veranstaltungsangebot der PTB zahlreiche Seminare, Workshops, Tagungen und Messebeteiligungen.

Fachmessen

Das Ziel der Fachmessen war es, wichtige Kontakte zur Industrie und zur Wirtschaft zu knüpfen bzw. zu intensivieren. Auf Messen wie der „Control“ in Stuttgart, der „Sensor+Test“ in Nürnberg und der „Optatec“ in Frankfurt präsentierte die PTB neueste Entwicklungen im Bereich der Messtechnik. Dies geschah vor allem auch im Sinne eines Technologietransfers von der PTB in die Wirtschaft. So war als Neuheit im April auf der Messe „Control“ ein Messgerät für Härteprüfungen zu sehen, mit dem vor allem die mechanischen Eigenschaften von Schichtwerkstoffen, wie Metall, Kunststoff und organische Materialien, gemessen werden können. Dieses Miniatur-Indentationsgerät ist dabei in MEMS-Technik (MikroElektroMechanisches System) ausgeführt. Um die Funktion von MEMS-Aktoren zu prüfen, ist es zudem erforderlich, die ebene Bewegung der beweglichen Teile mit hoher Auflösung und Genauigkeit quantitativ zu ermitteln. Hierzu wurde das Konzept der lateralen scannenden Mikroskopie entwickelt und ebenfalls auf der Messe vorgestellt. Auf beide Geräte sind Patente angemeldet. Eine technische Neuerung auf einem ganz anderen Fachgebiet, die ebenfalls mit einem Patent belegt ist, wurde auf der Messe „Sensor+Test“ im Mai präsentiert: Um auch an schwer zugänglichen Orten Messdaten zu erfassen, sind autark arbeitende Datenlogger notwendig. Die neueste Entwicklung aus der PTB hierzu erlaubt das Messen von digitalen und analogen Signalen in 4 unabhängigen Kanälen mit einem einzigen handlichen Gerät und die Speicherung aller Messwerte auf einer SD Speicherkarte. Ein PTB-typisches Einsatzgebiet dieses Datenloggers sind etwa die Messungen zur Umgebungs-Äquivalentdosis an Bord von Verkehrsflugzeugen.

Trade fairs, conferences, events

If 2007 in Braunschweig was completely in keeping with the slogan “City of Science” – with countless events for the general public –, then the events organized and supported by the Press and Information Office in 2008 rather focused on a specialist professional audience. The events offered by the PTB encompassed numerous seminars, workshops, conferences and appearances at trade fairs.

Specialized trade fairs

The goal of the specialized trade fairs was to make or intensify important contacts with industry and business. At trade shows like “Control” in Stuttgart, “Sensor+Test” in Nuremberg and “Optatec” in Frankfurt, PTB presented the latest developments in the metrology field. This took place, above all, as a technology transfer from PTB to the economy. At the “Control” show in April, an innovative measuring instrument for hardness measurement was, thus, to be seen, with which above all the mechanical characteristics of layered materials, such as metal, plastic and organic material can be measured. This miniature indentation device is realized in the MEMS technique (micro-electro-mechanical system). In order to test the function of the MEMS actuators, it is also necessary to quantitatively determine the plane movement of the moveable parts with a high resolution and accuracy. The concept of the lateral scanning microscopy was developed for this purpose and was also presented at the show. Patents have been registered for both devices. A technical innovation in a completely different specialist area which has also been patented was presented at the trade fair “Sensor+Test” in May: in order to also record measurement data at locations which are difficult to access, independently working data loggers are necessary. The latest developments from PTB in this field allow the measurement of digital and analogue signals in 4 independent channels with a single handy device, and the saving of all the measurement data on an SD memory board. A typical PTB field of application for this data logger is, for instance, measuring for the ambient dose equivalent on board aircraft.

Tagungen

Zur fünften ICRM-Tagung (International Conference on Radionuclide Metrology Low-Level Radioactivity Measurement Techniques) trafen sich im September 2008 insgesamt 110 Wissenschaftler aus 27 Ländern. Diese internationale Konferenz zur Umweltradioaktivität fand in Braunschweig statt. In der Umweltradioaktivität geht es dabei oft darum, auch sehr geringe Mengen von Radionukliden bis in den Millibecquerel-Bereich in sehr kleinen Proben exakt zu bestimmen. Daraus resultiert auch das primäre Ziel der Tagung, nämlich der Austausch über neueste Mess-, Analyse- und Kalibrierverfahren, um die Qualität von Radioaktivitätsmessungen weiter zu verbessern.

Ebenfalls fortgesetzt wurde, ausgerichtet vom PTB-Fachbereich „Quantenelektronik“, die Tagungsreihe „Kryoelektronische Bauelemente“ – die im Oktober 2008 in Königsutter stattfand. Seit mehr als 25 Jahren versteht sich die Tagung als aktives Diskussionsforum für neueste Entwicklungen auf dem Gebiet der Supraleitungselektronik und Kryotechnik. Wie auch in den vergangenen Jahren hatten Wissenschaftler und Ingenieure aus dem Hochschulbereich, den Forschungszentren und der Industrie Gelegenheit, aktuelle Forschungsergebnisse zu den Grundlagen und Anwendungen der Kryoelektronik vorzustellen und zu diskutieren.

Publikumsveranstaltungen

Neben den fachspezifisch ausgerichteten Messen und Tagungen gehörten jedoch auch einige öffentlichkeitswirksame Aktionen zum Veranstaltungsjahr 2008. Bei der 8. Langen Nacht der Wissenschaften (an der sich nahezu alle Berliner Forschungseinrichtungen beteiligen) standen am 14. Juni allen Interessierten die Türen auch im Institut Berlin der PTB offen. An diesem Abend freute sich die PTB besonders, dass im Rahmen der Eröffnungsveranstaltung im historischen Hermann-von-Helmholtz Bau der Startschuss für die „klügste Nacht des Jahres“ gegeben wurde. Die PTB präsentierte sich in dieser Nacht mit dem Thema „Magnetismus“ und stellte ihre Forschungen zu Magnetresonanztomographen (mit ihren extrem starken Magnetfeldern) ebenso vor wie die Forschungsarbeiten zum Biomagnetismus, bei dem die schwachen

Conferences

At the fifth ICRM conference (International Conference on Radionuclide Metrology Low-Level Radioactivity Measurement Techniques) in September 2008, a total of 110 scientists from 27 countries came together. This international conference on environmental radioactivity took place in Braunschweig. In environmental radioactivity, exactly determining even very small amounts of radionuclides up to the millibecquerel range in very small samples, is often dealt with. The primary aim of the conference also resulted from this, namely exchanging data about the latest measurement, analytical and calibration methods, to further improve the quality of radioactivity measurements.

The conference series “Cryoelectronic Components” – which took place in Königsutter in October 2008 and was organized by the PTB “Quantum Electronics” Department - was also continued. For more than 25 years, the conference has represented an active forum for discussion on the latest developments in the field of superconduction electronics and cryotechnology. Just as in previous years, scientists and engineers from the academic field, research centres and industry had the opportunity to present and discuss current research results on the fundamentals and applications of cryoelectronics.

Events for the public

Apart from the specialist trade shows and conferences, several effective publicity actions were, however, also some of the events in 2008. On the 8th Long Night of the Sciences (in which almost all of Berlin’s research institutes participated) on 14th June, the doors - also to PTB’s Berlin Institute - were open to all those who were interested. On that evening PTB was particularly happy that the starting signal for the “cleverest night of the year” was given in the frame of the opening event in the historic Hermann von Helmholtz Building. PTB presented itself in this night with the subject of “Magnetism” and showed its research on magnetic resonance tomography (with its extremely strong magnetic fields) along with the research work on biomagnetism, in which the weak magnetic fields produced naturally in the body are

körpereigenen Magnetfelder in speziell abgeschirmten Kabinen mit hochempfindlicher SQUID-Technik gemessen werden.

Eine weitere Publikumsveranstaltung fand ebenfalls in Berlin statt: Im August beteiligte sich die PTB am Tag der offenen Tür des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) und stellte ihre Arbeiten rund um Waagen, Wägetechnik und alle Arbeitsschritte einer Bauartzulassung vor. Mit mehreren Exponaten des Waagen-Herstellers Sartorius konnte zudem die Vielfältigkeit moderner Waagen (von der Körperfettwaage bis zur Feinwaage) demonstriert werden.

Die Organisation von Publikumsveranstaltungen nahm im Vergleich zu den Fachveranstaltungen jedoch eher einen kleinen Raum ein. Gegenüber einem Fachpublikum hat sich die PTB im vergangenen Jahr mit unterschiedlichen Themen auf fünf Messen präsentiert, 21 Tagungen bzw. Workshops organisiert sowie 4 PTB-Seminare angeboten.

measured in special shielded cubicles with highly sensitive SQUID technology.

Another public event also took place in Berlin: in August, PTB participated in the Open Day of the Federal Ministry of Economics and Technology (BMWi) and presented its work relating to weighing instruments, weighing technology and all the working steps in a type approval. With several exhibits from the weighing instrument manufacturer Sartorius, the variety of modern weighing instruments (from body fat scales to the fine balance) could additionally be demonstrated.

The organization of events for the general public, however, played a minor role compared to arranging specialist events. PTB presented itself with various topics to a specialist audience at five trade fairs last year, it organized 21 conferences and workshops and offered 4 PTB seminars.

Veranstaltungen (Auswahl)

Messen

21. – 25. April	Interkama, Hannover
22. – 25. April	Control, Stuttgart
6. – 8. Mai	Sensor+Test, Nürnberg
17. – 20. Juni	Optatec, Frankfurt a. M.
16. – 21. September	Automechanika, Frankfurt a. M.

Seminare

27. – 28. Mai	243. PTB-Seminar: Anwendung der MID bei Herstellern
28. – 29. Mai	241. PTB-Seminar: Mehrwert-Zertifizierungsdienstleistungen für moderne Elektrizitätszähler
12. – 13. Juni	242. PTB-Seminar: Klinische Basisdosimetrie nach DIN 6800/2
16. – 17. September	244. PTB-Seminar: 50 Jahre Geschwindigkeitsüberwachungsgeräte mit Zulassung der PTB

Tagungen/Workshops

12. – 13. Februar	EMATEM (European Metrology Association for Thermal Energy Measurement)-Seminar
26. – 30. Mai	4. Photometrie-Seminar
16. – 28. Juni	Dimensionelle Messtechnik mit Rasterkraftmikroskopen
3. – 4. Juli	Measurements for Life Science, EMRP Symposium
1. – 4. September	Summer School of Metrology
22. – 26. September	International Conference on Radionuclide Metrology and its Applications Low Level Measurement (ICRM 2008)
6. – 8. Oktober	Kryoelektronische Bauelemente 2008

Zahlen und Fakten • Figures and Facts

Personal: Entwicklung • Staff: development

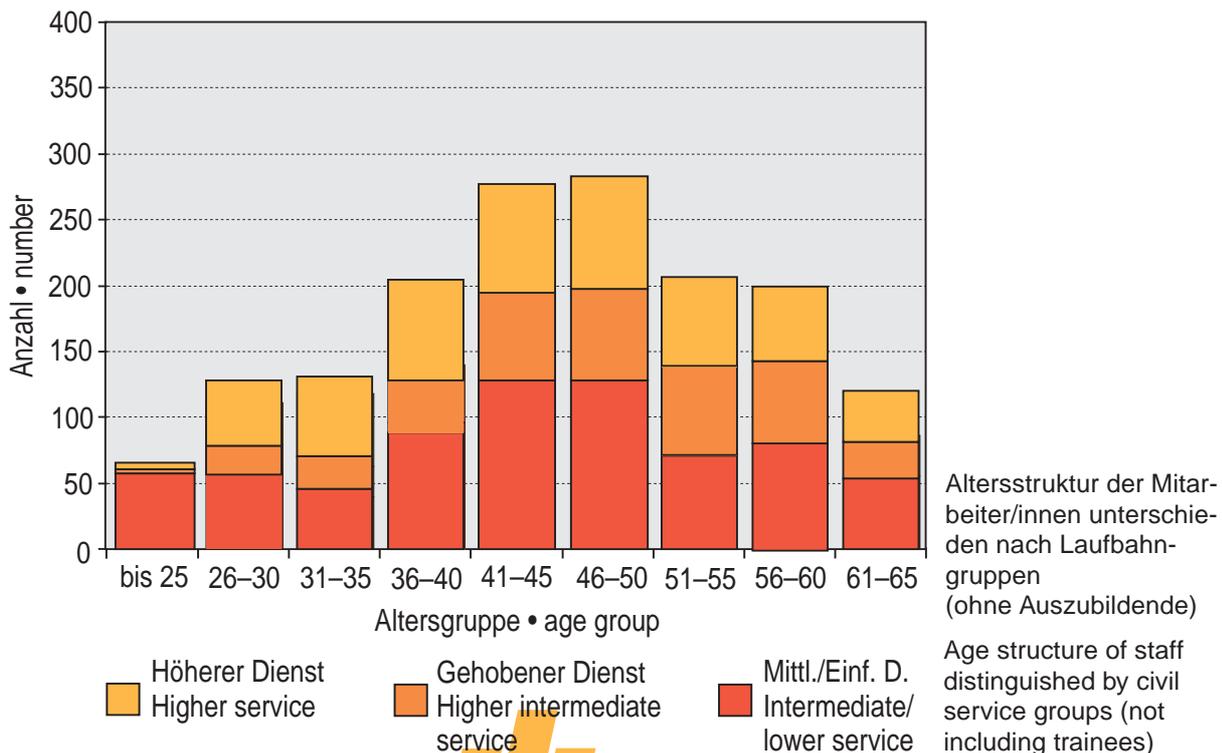
Personelle Entwicklung von 1999 bis 2008 (Stand: 31. Dezember 2008) • Development of staff

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

Beschäftigungsverhältnis	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
a)										
Beamte • civil servants	490	501	503	507	506	508	510	515	523	517
Angestellte • employees	821	808	786	767	744	727	692	863	833	830
Arbeiter • workers	229	207	211	208	207	193	196	—*	—	—
gesamt • total	1540	1516	1500	1482	1457	1428	1398	1378	1356	1347
b)										
Auszubildende • trainees	151	147	136	138	144	158	159	150	136	134
Befristet Beschäftigte temporary staff	32	44	52	53	52	61	69	66	98	110
Drittmittelpersonal staff members financed by third parties	70	92	104	106	122	105	109	169	162	172
Mitarbeiter gesamt staff member total	1793	1799	1792	1779	1775	1752	1735	1763	1752	1763

* Seit In-Kraft-Treten des TVöD am 1.10.2005 werden Angestellte und Arbeiter als „Beschäftigte“ zusammengefasst./Since the coming into force of the TVÖD (Collective Agreement for the Public Service) on 1 October 2005, salaried employees and wage earners have been consolidated as „employees“.

Personal: Altersstruktur • Staff: age structure



Ausbildung • Training (31. Dezember 2008)

	BS	Berlin	
IT-Systemelektroniker Elektroniker/in für Geräte und Systeme	17 (7)	- -	information and telecommunication technologists electronics technician for devices and systems
Physiklaboranten	30 (7)	- -	laboratory technicians, physics
Elektroniker für Energie- und Gebäudetechnik	22 (6)	- -	electronics engineer for electrical and building services engineering
Feinwerkmechaniker	13 (4)	- -	precision instrument maker
Fachrichtung Feinmechanik	12 (4)	6 (2)	speciality: precision mechanics
Fotografen	4 (2)	- -	photographers
Technische Zeichner	3 (0)	- -	draftsmen
Mikrotechnologen	1 (1)	- -	microtechnologists
Mediengestalter	1 (1)	- -	media designer
Tischler	- -	4 (0)	joiners
Systeminformatiker	- -	12 (4)	IT systems technicians
Fachangestellte für Bürokommunikation	- -	6 (3)	specialists in office communications
Verwaltungsfachangestellte	- -	3 (0)	public administration employee
gesamt	103 (32)	31 (9)	total

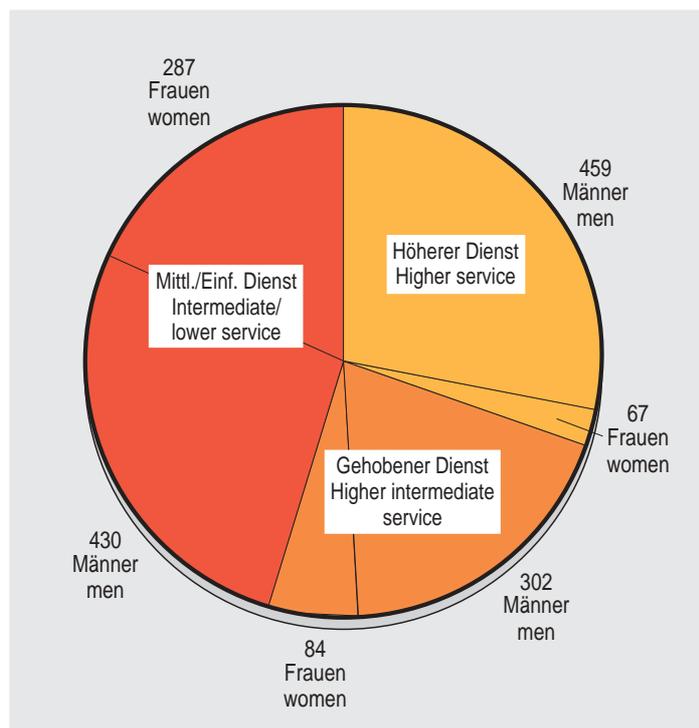
Die PTB gehört zu den größten Ausbildungsbetrieben in der Region. Gegenwärtig sind 134 Auszubildende bei der PTB angestellt. In Klammern sind die Neueinstellungen im Berichtsjahr angegeben.

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

**Personal: Laufbahn
Staff: civil service
career**

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

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



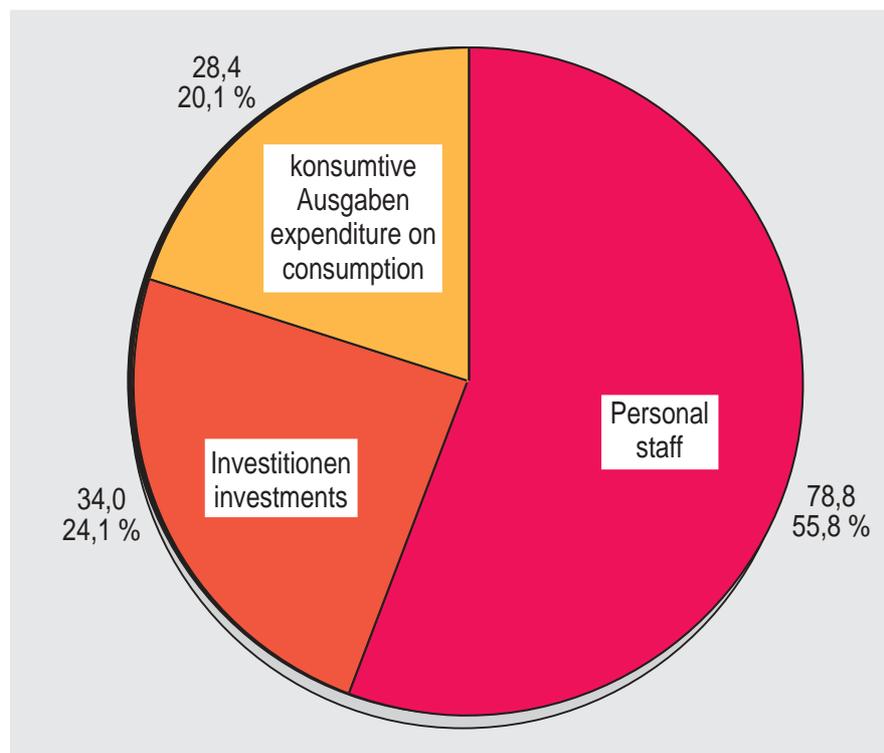
Haushalt: Gebühren • Budget: charges

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	2006	2007	2008	charges
Amtshandlungen und sonstige Gebühren	6087	6457	7097	official acts and repayment work; other fees
Prüfung und Zulassung von Spielgeräten	1934	2162	4419	tests and approvals of gaming machines
von Prüfstellen (Elektrizität)	393	222	311	of test centres (electricity)
Leistungen im Rahmen des DKD	1465	1693	992	services rendered within the framework of DKD
gesamt	9879	10534	12819	total

Haushalt: Ausgabenverteilung • Budget: break-down of expenditure



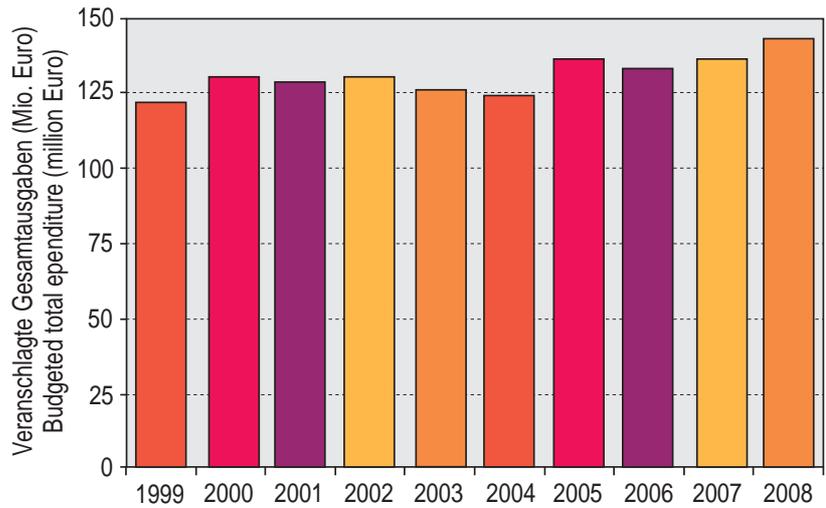
Die Grafik zeigt, wie sich im Berichtsjahr die veranschlagten Ausgaben verteilen (in Mio. Euro). Zum Vergleich nennt die Tabelle die Vergleichszahlen der letzten Jahre.

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	2006	2007	2008	budgetary means
Personalausgaben	77,7	74,4	78,8	staff costs
Investitionen (Bau und Geräte)	26,8	29,0	34,0	investments (building activities and instruments)
konsumtive Ausgaben	26,0	29,5	28,4	expenditure on consumption
gesamt	130,5	132,9	141,2	total

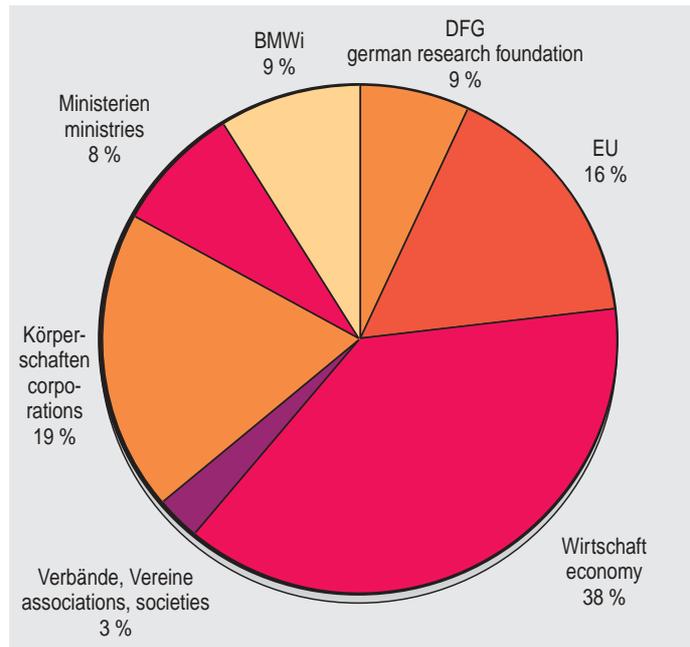
Haushalt: Entwicklung • Budget: development



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 2008 auf 8,6 Mio. EURO. Die Grafik gibt die prozentualen Anteile der unterschiedlichen Quellen an. Insgesamt wurden im Berichtsjahr 15,3 Mio. EURO für 477 Drittmittelprojekte (Forschungsvorhaben und Projekte der Technischen Zusammenarbeit) verwendet (davon 2,7 Mio. EURO für 81 Projekte in Berlin).



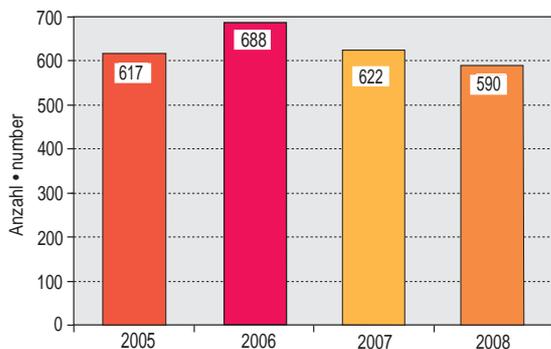
In 2008, the third-party funds for research projects added up to a total of 8,6 million EURO. The chart shows the contributions (in percent) from the different sources. In the year under review, a total of 15,3 million EURO were used for 477 third-party projects (research projects and technical cooperation projects), 2,7 million EURO of these for 81 projects in Berlin.

Umwelt: Verbrauchszahlen • Environment: consumption figures

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

... in Braunschweig		2006	2007	2008	
elektrische Energie	MWh	26 495	26 119	25 597	electrical energy
Wärme	MWh	24 206	20 492	23 681	heat
Gas	m ³	30 855	26 775	30 763	gas
Wasser	m ³	92 492	87 419	88 210	water
Abfälle:					waste produced:
hausmüllähnliche					
Gewerbeabfälle	t	57	54	64	refuse-like industrial waste
recycelte Abfälle	t	282	398	379	recycled waste
Abfälle zur Beseitigung	t	21	94	32	hazardous waste
Entsorgungskosten (ca.)	EUR	71 721	78 204	91 409	waste disposal costs (approx.)
... in Berlin		2006	2007	2007	
elektrische Energie	MWh	4595	5883	7050	electrical energy
Gas	m ³	51 727	49 200	47 200	gas
Wasser	m ³	29 800	24 650	32 800	water
Helium, flüssig	l	48 100	44 100	53 280	helium, liquid
Stickstoff, flüssig	l	55 500	57 798	80 838	nitrogen, liquid
Abfälle:					waste produced:
hausmüllähnliche					
Gewerbeabfälle	t	56	64	65	refuse-like industrial waste
recycelte Abfälle	t	28	25	32	recycled waste
Abfälle zur Beseitigung	t	4	4	4	hazardous waste
Entsorgungskosten (ca.)	EUR	9900	9500	11 800	waste disposal costs (approx.)

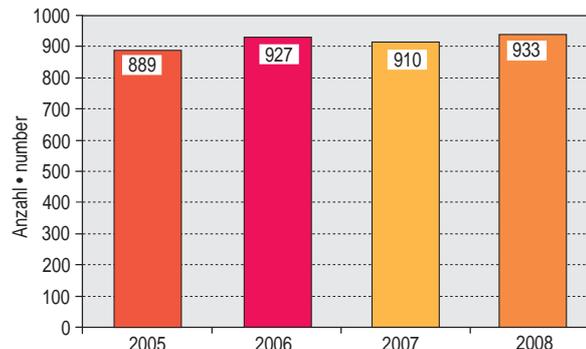
Veröffentlichungen • Publications



Anzahl der Veröffentlichungen der PTB-Mitarbeiter/innen (in wissenschaftlichen Journalen, Büchern, Tagungsbänden etc.) in den Jahren 2005 bis 2008 (vgl. Datenbank „PTB-Publica“ im Internet)

Number of publications by PTB staff members (in scientific journals, books, conference digests, etc.) between 2005 and 2008 (cf. database “PTB-Publica” on the web)

Vorträge • Lectures



Anzahl der auswärtigen Vorträge, die PTB-Mitarbeiter/innen in den Jahren 2005 bis 2008 gehalten haben

Number of lectures held by PTB staff members outside PTB between 2005 and 2008

Aus dem Veranstaltungskalender • Events

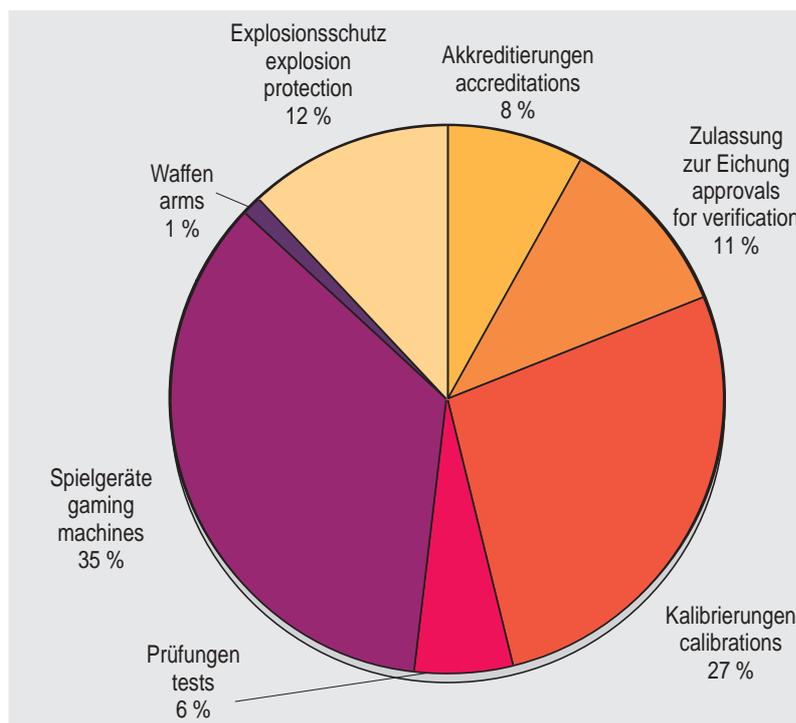
	2006	2007	2008	
PTB-Seminare	13	12	4	PTB Seminars
Tagungen, Workshops, etc.	27	17	21	Conferences, workshops, etc.
Kolloquien	68	73	82	Colloquies

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

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

Aufteilung der Einnahmen • Distribution of the income

Aufteilung der Einnahmen im Jahr 2008 auf die verschiedenen Dienstleistungsbereiche der PTB. Gesamteinnahmen: 12,82 Millionen Euro.



Distribution of the income of 2008 among the various service sectors of PTB. Total receipts: 12.82 million euro.

Projektpartner der PTB

PTB's project partners



Internationale Zusammenarbeit

Der Fachbereich *Technische Zusammenarbeit* der PTB arbeitet in 45 Projekten. Direkt oder indirekt werden mehr als 80 Entwicklungs- und Schwellenländer erreicht. Die Projektarbeit umfasst alle Elemente der Qualitätsinfrastruktur. Der Schwerpunkt liegt auf der Systemberatung und der fachlich-technischen Beratung. Die Finanzierung erfolgt zum größten Teil durch das Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung.

Im Jahr 2008 wurden 21 Länder in vier Kontinenten durch 23 bilaterale Projekte beim Aufbau ihrer Qualitätsinfrastruktur unterstützt. 22 Projekte verfolgen einen regionalen oder sektoralen Ansatz. Die Projektmittel im Jahr 2008 betragen 6,9 Mio. EUR. Es wurden 89 Stipendiaten aus 35 Ländern insgesamt mehr als 34 Monate in der PTB, in den Eichbehörden der Bundesländer, der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, in Firmen und Universitäten, in Laboratorien des Deutschen Kalibrierdienstes und in nationalen Metrologieinstituten fortgebildet. Die Nationalflaggen und die regionalen Embleme zeigen, wo die PTB ihre Projekte durchführt.

International Cooperation

PTB's *Technical Cooperation* Department is active in 45 projects by which more than 80 developing countries and countries in transition are reached directly or indirectly. The project work comprises all elements of the quality infrastructure. Work is focussed on system consultancy and technical consultancy services. Most part of the work is financed by the Federal Ministry of Technical Cooperation and Development.

In 2008, 21 countries in four continents were supported in the establishment of their quality infrastructure by 23 bilateral projects. 22 projects follow a regional or sectoral approach. In 2008, the project funds amounted to 6.9 million EUR.

89 scholar-ship holders from 35 countries have been trained for more than totally 34 months at PTB, at the verification authorities of the federal states, at the Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (Federal Institute for Materials Research and Testing), in companies and universities, in laboratories of the German Calibration Service and in national metrology institutes.

The ensigns and the regional emblems show where PTB performs its projects.

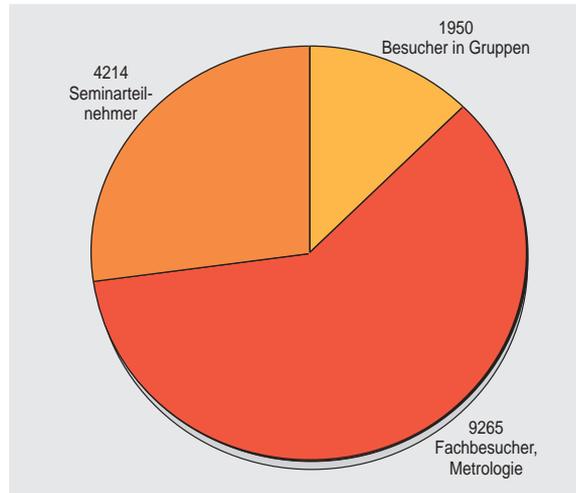
Gastwissenschaftler, Gäste und Besucher

Im letzten Jahr kamen 15 429 Besucher aus aller Welt in die PTB (Standort Braunschweig). Den größten Anteil bildeten die metrologischen Fachbesucher aus Wissenschaft und Wirtschaft (9265) sowie die Teilnehmer an unterschiedlichsten Seminaren, Tagungen und Kolloquien (4214). Auch der allgemeine Besucherdienst der PTB, im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit, fand wie gewohnt regen Zuspruch. 1950 Besucher (in 70 Gruppen) schauten den Wissenschaftlern in Braunschweig über die Schultern.

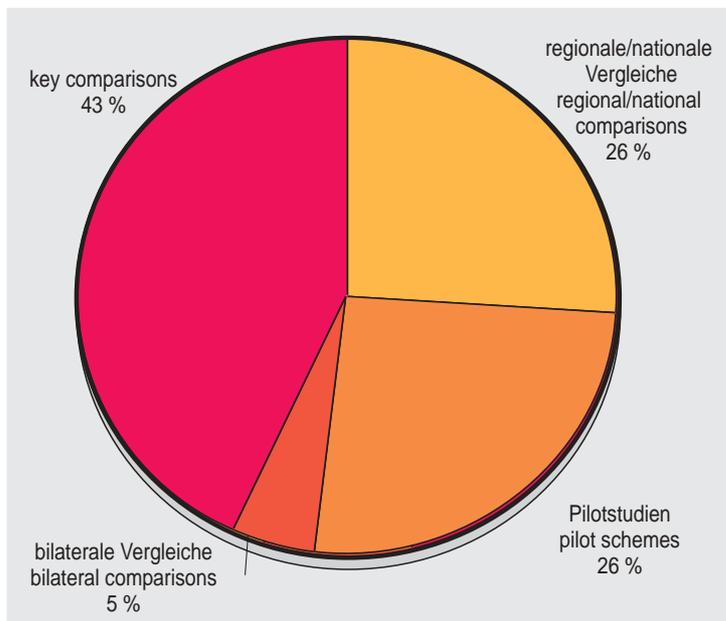
Guest scientists, guests and visitors

Last year, 15 429 people from all parts of the world visited PTB (Braunschweig site). Most of them were metrological professionals from science and economy (9265) as well as participants in the diverse seminars, meetings and colloquia (4214).

PTB's general visitor service within the scope of public relations work was also popular as usual. 1950 visitors (in 70 groups) observed the scientists work in their laboratories.



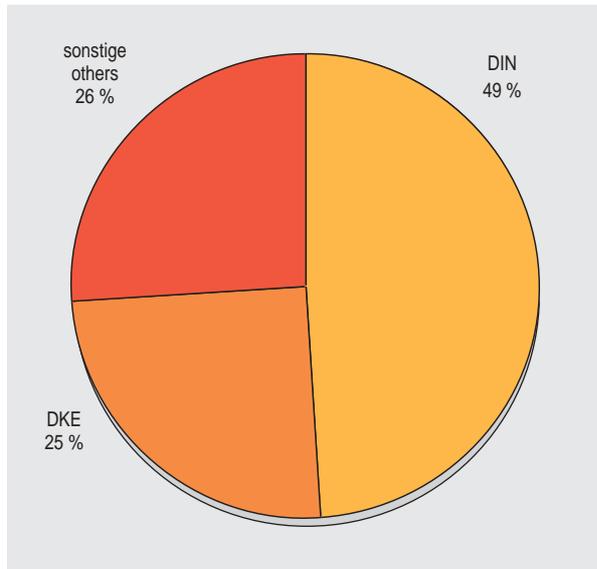
Internationale Vergleichsmessungen • International comparison measurements



In the year under report, PTB took part in 65 comparable measurements, namely 28 key comparisons, 17 regional/national comparisons, 17 pilot studies and 3 bilateral comparisons. 51 % of the comparable measurements were of direct relevance to the calibration and measurement capabilities of PTB within the scope of the CIPM MRA. PTB participated in 12 comparable measurements as a pilot lab.

Die PTB nahm im Berichtsjahr an 65 Vergleichsmessungen teil und zwar an 28 Schlüsselvergleichen, 17 regionalen/ nationalen Vergleichen, 17 Pilotstudien und 3 bilateralen Vergleichen. 51 % der Vergleichsmessungen waren von direkter Relevanz für die Kalibrier- und Messmöglichkeiten der PTB im Rahmen des CIPM-MRA. An 12 Vergleichsmessungen nahm die PTB als Pilotlabor teil.

Nationale Normungsvorhaben • National standardization projects

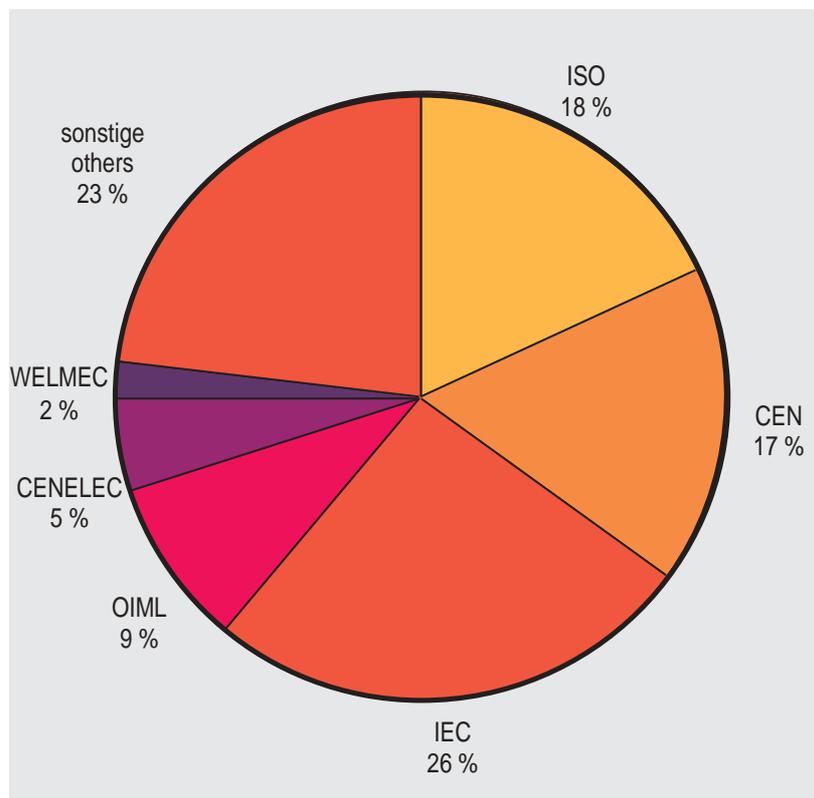


Prozentuale Verteilung der Gremienarbeit der PTB bei nationalen Normungsvorhaben. Innerhalb des *Deutschen Instituts für Normung e. V.* (DIN) war die PTB an 152 Normenvorhaben beteiligt, bei der *Deutschen Elektrotechnischen Kommission* (DKE) bei 77 Vorhaben.

Break-up of the PTB's committee work for national standardization projects (in percent). PTB cooperated in 152 projects of the *Deutsches Institut für Normung* (DIN) and in 77 projects of the *Deutsche Elektrotechnische Kommission* (DKE).

Internationale Normungsvorhaben • International standardization projects

Prozentuale Verteilung der Gremienarbeit der PTB bei internationalen Normungsvorhaben. (312 Vorhaben im letzten Jahr) ISO: Internationale Organisation für Standardisierung; CEN: Europäisches Komitee für Normung; IEC: Internationale Elektrotechnische Kommission; OIML: Internationale Organisation für das gesetzliche Messwesen; CENELEC: Europäisches Komitee für elektrotechnische Normung; WELMEC: European Cooperation in Legal Metrology.



Distribution (in percent) of PTB's committee work on international standardization projects. (312 projects in the last year) ISO: International Organization for Standardization; CEN: European Committee for Standardization; IEC: International Electrotechnical Commission; OIML: International Organization of Legal Metrology; CENELEC: European Committee for Electrotechnical Standardization; WELMEC: European Cooperation in Legal Metrology.

Promotionen 2008 • Doctorates in 2008

Christoph Kling (1.7)	Investigations into damping in building acoustics by the use of downscaled models
Marco Antonio Lopez Ordonez (4.1)	Optical characterization of Ge- and InGaAs semiconductor detectors for high accuracy optical radiant power measurements in the near infrared
Matthias Wurm (4.2)	Über die dimensionelle Charakterisierung von Gitterstrukturen auf Fotomasken mit einem neuartigen DUV-Scatterometer
Martin Gerlach (7.1)	Entwicklung und Anwendung der Kryoradiometrie mit harter Röntgenstrahlung
Klaus Anhalt (7.3)	Radiometric measurement of thermodynamic temperatures during the phase transformation of metal-carbon eutectic alloys for a new high-temperature scale above 1000 °C
Martin Fahr (7.42)	Parasitäre Wärmeflüsse und Verunreinigungen in Reinstmetall-Fixpunkten der Internationalen Temperaturskala
Christof Gaiser (7.43)	Properties of helium and gas thermometry

Habilitationen 2008 • Habilitations in 2008

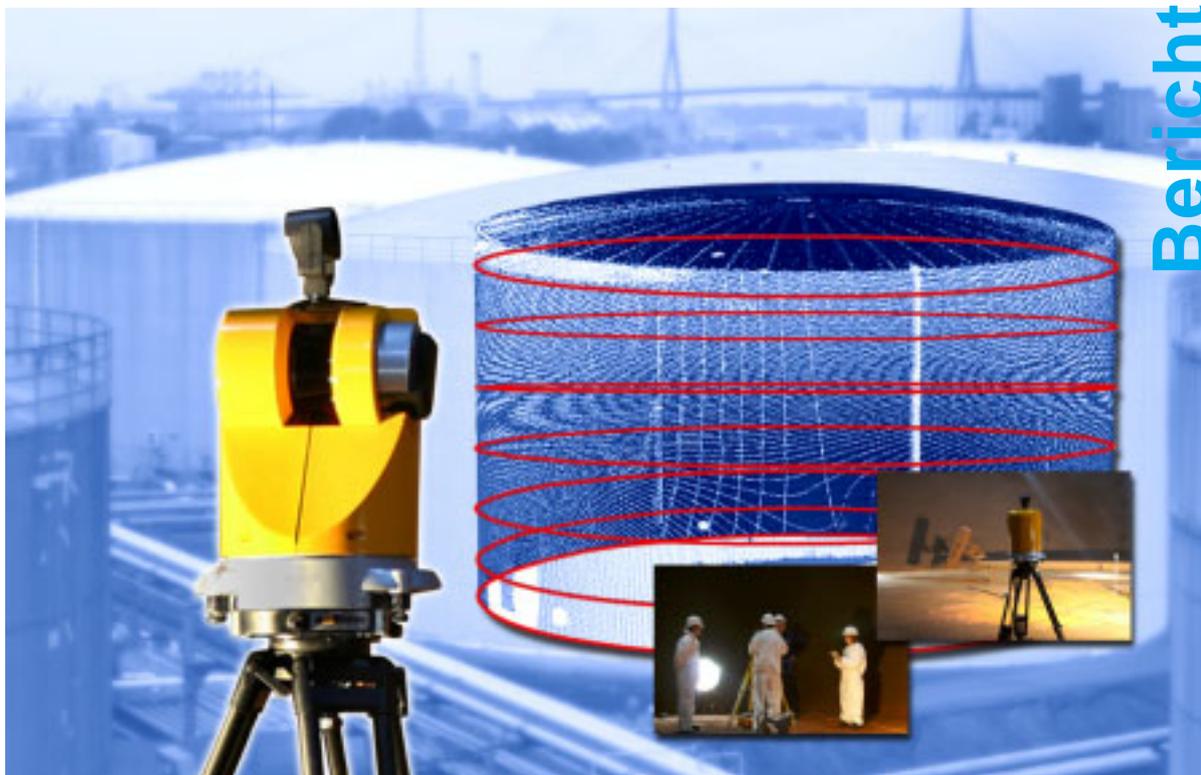
Jürgen Hartmann (7.3)	High-temperature measurement techniques for the application in photometry, radiometry and thermometry Privatdozentur „Photometrie und Radiometrie“
-----------------------	---

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

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

Mechanik und Akustik

Berichte der Abteilungen



Abteilung
1

Mechanik und

1. Mechanik und Akustik

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

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

1.1 Masse und abgeleitete Größen

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

Titelbild:

Neues laseroptisches Verfahren zur geometrischen Vermessung großer Lagerbehälter, entwickelt im Rahmen eines Gemeinschaftsprojektes von PTB, Eichbehörden und dem Hersteller des Laserscanners für den Einsatz im gesetzlich geregelten Bereich.

Das Bild zeigt den Kopf des Laserscanners, der sowohl horizontal wie auch vertikal in jeweils 0,25 °-Schritten den Innenraum des zu vermessenden Lagerbehälters abscannt.

Durch den Einsatz von Auftriebskörpern zur gravimetrischen Bestimmung der Luftdichte konnte im Fachbereich *Masse* die Unsicherheit der Auftriebskorrektur bei Präzisionsmassbestimmungen deutlich reduziert werden. Derzeit sind relative Standardmessunsicherheiten im Bereich von $2 \cdot 10^{-5}$ erreichbar.

Weitere Verbesserungen wurden durch die Anwendung der im Jahr 2007 vom Comité International des Poids et Mesures (CIPM) aktualisierten CIPM-Gleichung zur Berechnung der Luftdichte erreicht. Die Unsicherheit der CIPM-Gleichung wurde damit von $6,5 \cdot 10^{-5}$ auf $2,2 \cdot 10^{-5}$ verringert. Für den Anschluss der PTB-Hauptnormale an das nationale Kilogrammprototyp führte die verbesserte Luftdichtebestimmung zu einer Reduzierung der Messunsicherheit um mehr als 40 % auf $u(m)/m < 1 \cdot 10^{-8}$.

Experimentelle Untersuchungen neuartiger Wägezellen (WZ) aus einkristallinem Silizium (Si) mit Dünnschicht-Dehnungsmessstreifen bestätigten die erwartete signifikante Verbesserung der messtechnischen Eigenschaften im Vergleich zu konventionellen, metallischen WZ. Untersuchungen der Kennlinien von Si-WZ und den besten verwendeten metallischen WZ gleicher Geometrie bei 20 °C zeigten eine um mehr als eine Größenordnung geringere Hysterese. Reproduzierbarkeit und Linearität sind für die Si-WZ ebenfalls deutlich besser als für die metallischen WZ. Bild 1 zeigt die Auswertung der Messdaten nach OIML R 60 für eine Richtigkeitsprüfung von WZ bei 20 °C. Im Gegensatz zur Stahl-WZ, die aufgrund der Hysterese im Signalverlauf die Fehlergrenzen nicht einhält, erreicht die unkompenzierte Si-WZ die Genauigkeitsklasse C 10. Durch eine digitale Kompensation der Nichtlinearität und weiterer Einflussgrößen konnte gezeigt werden, dass mit einer Si-WZ sogar mehr als 50 000 Teilungsschritte erreicht werden können.

Ind Akustik

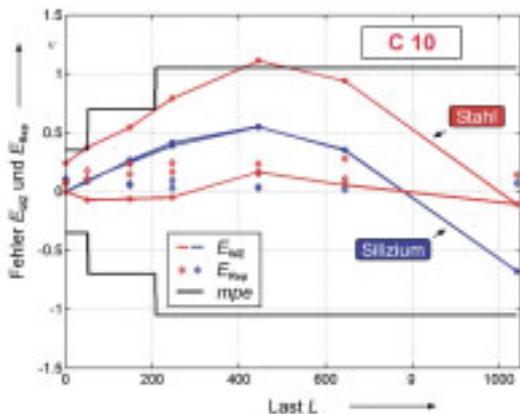


Bild 1: Wägezellenfehler E_{WZ} und Reproduzierbarkeitsfehler E_{Rep} nach OIML R60 als Funktion der Last für eine Stahl- und eine Silizium-Wägezelle bei 20 °C. Angegeben sind die Fehlergrenzen (mpe) für die Genauigkeitsklasse C 10 mit 10000 Teilungsschritten.

Unter Federführung der PTB wurde ein neuer WELMEC-Leitfaden (WELMEC 2.8) erarbeitet und 2008 veröffentlicht, der Bauartprüfungen von selbsttätigen Waagen (SW) wesentlich erleichtert. In vielen Fällen werden Waagen zunächst als nichtselbsttätige Waagen (NSW) zur Prüfung gestellt und zugelassen. Wenn später die NSW auch eine Zulassung als SW erhalten soll, können unter bestimmten Voraussetzungen die früheren Prüfergebnisse verwendet und so Wiederholungsprüfungen vermieden werden. Der neue WELMEC-Leitfaden beschreibt die entsprechenden messtechnischen Anforderungen und Voraussetzungen sowie die notwendigen Berechnungen, die insbesondere bei selbsttätigen Waagen zum Abwägen (SWA) erforderlich sind.

Zur Vorbereitung einer möglichen Neudefinition der Masseneinheit „Kilogramm“ wurde auf Initiative des *Comité Consultatif pour la Masse et les grandeurs apparentées (CCM)* eine neue Arbeitsgruppe „Mass metrology under vacuum for a *mise en pratique*“ mit 12 Teilnehmerinstitutionen gegründet. Den Vorsitz übernahm die PTB. Das erste Treffen fand im April dieses Jahres am BIPM in Sèvres bei Paris statt. Zu den wesentlichen Aufgaben der Arbeitsgruppe gehören die Erarbeitung von Richtlinien zur Durchführung von Massebestimmungen unter Vakuumbedingungen, einschließlich der Aspekte Luft-Vakuum-Transfer, Aufbewah-

rung (in Luft, Vakuum oder Schutzgas), Transport und Reinigung von Massenormalen.

Im Fachbereich *Festkörpermechanik* werden mit Kraft-Normalmesseinrichtungen Kräfte von 0,5 N bis 16,5 MN realisiert. Die große Nachfrage nach Kalibrierungen größer als 2 MN wurde in der Vergangenheit ausschließlich durch die 16,5-MN-Kraft-Normalmesseinrichtung (K-NME) sichergestellt, was leider immer wieder zu Engpässen führte. Es lag daher nahe, die vom ASMW (Amt für Standardisierung, Messwesen und Warenprüfung der DDR) übernommene, hydraulische 5-MN-K-NME (Bild 2) zur Entlastung einzusetzen. Die erforderliche Modernisierung sowohl einiger mechanischer Komponenten als auch der Regelelektronik und Softwaresteuerung konnte im vergangenen Jahr erfolgreich abgeschlossen werden. Durch Vergleichsmessungen mit der 2-MN-K-NME und der 16,5-MN-K-NME unter Verwendung hochpräziser Transfornormale konnte nachgewiesen werden, dass die relative Messunsicherheit der modernisierten 5-MN-K-NME auf $\leq 0,01\%$ reduziert wurde.

Neben der statischen Kraftmessung ist ein aktueller Arbeitsschwerpunkt die Rückführung von dynamischen Kräften. Im letzten Jahr wurde ein Messwerterfassungssystem realisiert, mit dem die Amplituden- und



Bild 2: Hydraulische 5-MN-K-NME mit gleichzeitig montiertem Zug- und Druckkraftaufnehmer

Phasenfrequenzgänge der gesamten Messkette bestehend aus Kraftaufnehmer und Messverstärker auf den vorhandenen Einrichtungen ermittelt werden kann. Die Zielsetzung ist dabei, zukünftig bis 1000 Hz für Kräfte $< 10 \text{ kN}$ und bis 100 Hz für Kräfte $< 100 \text{ kN}$ eine Rückführung anbieten zu können. Mit eigenen ausgesuchten Kraftaufnehmern der PTB soll dann im kommenden Jahr ein erstes dynamisches Kraft-Transfermesssystem realisiert werden, mit dem in ausgesuchten Anwendungen wie z.B. bei Schwingprüfmaschinen Messungen vor Ort beim Kunden möglich werden.

Der weltweit erste, im Rahmen des CIPM durchgeführte, internationale Vergleich („key comparison“) CCM.T-K1 für Drehmomente von $500 \text{ N} \cdot \text{m}$ und $1 \text{ kN} \cdot \text{m}$ wurde abgeschlossen. An ihm nahmen acht Staatsinstitute teil, wobei die PTB als Pilotlabor für die

Bild 3: Internationale Vergleichsmessung für ein Drehmoment von $500 \text{ N} \cdot \text{m}$ (Key comparison CCM.T-K1). Dargestellt sind die relativen Abweichungen der korrigierten Ergebnisse (Punkte) der Teilnehmer vom Referenzwert (Nulllinie) für den Aufnehmer TB2 und den Drehmomentwert $500 \text{ N} \cdot \text{m}$ Rechtsdrehmoment. Die Balken sowie das graue Band stellen die jeweils zugeordneten erweiterten Messunsicherheiten ($k = 2$) dar. Teilnehmer (v.l.n.r.): METAS (Schweiz), CEM (Spanien), KRISS (Südkorea), NMIJ (Japan), INMETRO (Brasilien), CENAM (Mexiko), NPL (Vereinigtes Königreich), PTB (Deutschland – Pilotlabor)

Organisation und Auswertung zuständig war. Der nun vorliegende und mit den Teilnehmern abgestimmte Bericht zeigt, dass die erweiterten Messunsicherheiten ($k = 2$) mit $1 \cdot 10^{-4}$ bis $2 \cdot 10^{-5}$ realistisch angegeben wurden (Bild 3). Dies macht deutlich, dass die Darstellung statischer Drehmomente mit sehr kleinen Messunsicherheiten inzwischen technisch beherrscht wird und als solide Basis für die metrologische Absicherung der Drehmomentmessung im weltweiten Maßstab gelten kann.

Die Drehmomentmesseinrichtung mit dem weltweit größten Messbereich von $1,1 \text{ MN} \cdot \text{m}$ wurde mit einer Bestückungsvorrichtung ausgestattet, die es ermöglicht, auch sehr große und schwere Aufnehmer mit einer Masse von bis zu 4 t in die Maschine einzubringen (Bild 4). Eine erste Bewährungsprobe hat die Vorrichtung mit einem ca. $2,3 \text{ t}$ schweren industriellen Aufnehmer bestanden, der bis etwa $700 \text{ kN} \cdot \text{m}$ zu kalibrieren war. Neben der Lösung von Sicherheitsfragen ergibt sich mit der neuen Vorrichtung auch ein Zeitgewinn beim Ein- und Ausbau großer Aufnehmer.

Zur Messung der vektoriellen Größen Kraft und Drehmoment kommen zunehmend Mehrkomponentensensoren auf den Markt, die aber nur für einzelne Komponenten und bisher auch nur bis zu 10 kN zurückgeführt werden können. Ziel ist es daher, neue Messeinrichtungen und Verfahren zu entwickeln, um zukünftig Mehrkomponentensensoren noch genauer und für größere Kräfte bis 100 kN und darüber zu kalibrieren. Im Rahmen eines industriellen Forschungsprojektes ist erstmals ein in der Industrie entwickelter 6-Komponenten-Kraftvektorsensor in der Hexapoden-Messeinrichtung messtechnisch untersucht worden. Die vielfältigen Einfluss-

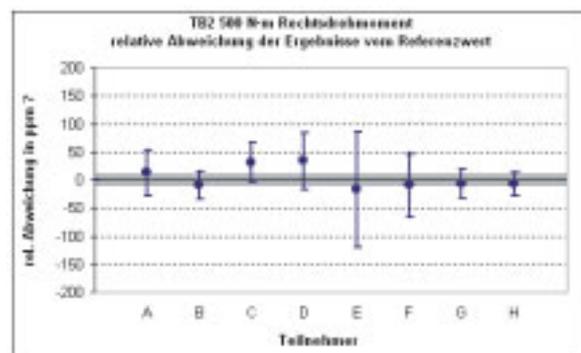




Bild 4: 1,1-MN-m-Drehmoment-Messeinrichtung mit Bestückungsvorrichtung.

größen wurden mit einem Messunsicherheitsmodell beschrieben, um das Messergebnis angeben zu können.

Das Experiment Ionenakkumulation mit dem Ziel, durch eine genaue Bestimmung der atomaren Massenkonzstante das Kilogramm neu zu definieren, wurde im Januar 2008 durch einen vorläufig letzten Versuch abgeschlossen. Durch den Einbau eines neuen Ablenkmagneten mit doppelter Apertur wurde eine deutliche Steigerung der akkumulierten Masse erreicht. In diesem letzten Versuch wurde mit einem Ionenstrom von etwa 5 mA an 3 Tagen in jeweils 8 Stunden eine Masse von ca. 325 mg Wismut akkumuliert. Die atomare Massenkonzstante wurde so mit einer relativen Unsicherheit von $9,4 \cdot 10^{-5}$ ermittelt (relative Abweichung vom CODATA-Wert: $9,2 \cdot 10^{-5}$)

Der Fachbereich *Kinematik* hat sich der Aufgabe angenommen, internationale Ringvergleiche für piezoelektrische Transfornormale für Druckmessungen auszurichten, die der PTB im Jahr 2007 vom „Ständigen Internationalen Komitee für die Prüfung von Handfeuerwaffen“ (C.I.P.) übertragen wurde. Diese Vergleiche müssen sowohl quasi-statisch als auch dynamisch (Druckamplitude bis 400 MPa, Pulsdauer ca. 3 ms) durchgeführt werden. Im

letzten Quartal 2008 erfolgten zunächst Vergleichsmessungen in Deutschland in Kooperation mit sechs Beschussämtern. Die gesammelten Erfahrungen sollen bei den für die nächsten Jahre 2009 und 2010 geplanten internationalen Vergleichsmessungen verwendet werden, an denen voraussichtlich alle 14 Mitgliedstaaten der CIP teilnehmen werden.

Seit dem 1. April 2008 müssen nach dem neuen Waffengesetz Erben von Waffen diese mit einem von der PTB zuzulassenden Blockiersystem versehen, das eine widerrechtliche Benutzung unmöglich macht, oder es muss der Missbrauch durch nichtberechtigte Personen erheblich erschwert werden. Die Blockiersysteme stellen typischerweise Sperr Elemente im Patronenlager dar, die ein Laden von Munition verhindern. Die Anforderungen an die Blockiersysteme ergeben sich aus einer vom Bundesministerium des Innern (BMI) herausgegebenen Technischen Richtlinie, die die Grundlage der neuen Zulassungsprüfungen durch die PTB darstellt. Die Prüfungen erstrecken sich auf mechanische und thermische Verfahren. Für Blockiersysteme von Kurzwaffen zweier verschiedener Hersteller konnten bereits in diesem Jahr die ersten Bauartzulassungen erteilt werden.

Die wesentlichen Baugruppen der projektierten 250-kN-Kraftstoß-NME werden zur Zeit im wissenschaftlichen Gerätebau der PTB gefertigt; die Inbetriebnahme der gesamten Apparatur ist für 2009 vorgesehen.

1.2 Durchfluss

Auf der Basis des Einheitengesetzes befassen sich die Fachbereiche 1.4 *Gase* und 1.5 *Flüssigkeiten* mit der Darstellung und Weitergabe der Einheiten für die Strömungsmessgrößen Menge, Durchfluss und Strömungsgeschwindigkeit von Gasen und Flüssigkeiten. Hierzu werden Forschungs- und Entwicklungsarbeiten mit dem Ziel durchgeführt, sowohl den

Darstellungsbereich als auch die erreichte Messunsicherheit an die steigenden Anforderungen von Industrie und Wissenschaft anzupassen. Aus dem Eichgesetz ergeben sich darüber hinaus vielfältige Aufgaben zur Sicherung der Einheitlichkeit und Richtigkeit der Durchflussmessungen im gesetzlich geregelten Bereich.

Im Zusammenhang mit der Durchflussmessung spielen häufig auch weitere metrologisch relevante Parameter, wie Dichte, Viskosität, kalorische und Explosionsschutz-Parameter sowie thermische Energie, eine wichtige Rolle. Daher besteht traditionell eine gute, abteilungsübergreifende Zusammenarbeit mit den Fachbereichen 3.2 *Analytische Messtechnik und Druck*, 3.3 *Chemisch-physikalische Stoffeigenschaften* in der Abteilung 3 *Chemische Physik und Explosionsschutz* sowie mit dem Fachbereich 7.6 *Wärme* in der Abteilung 7 *Temperatur und Synchrotronstrahlung*. Mit einer neuen Konzeption und regelmäßigen, abteilungsübergreifenden Arbeitstreffen wird die PTB-interne Zusammenarbeit auf dem Gebiet *Durchfluss* weiter gestärkt, so dass auch neuen Herausforderungen, wie dem Europäischen Metrologie-Forschungsprogramm (EMRP), angemessen begegnet werden kann.

Ein aktueller Schwerpunkt des Fachbereichs *Gase* ist die Modernisierung und weitere Verbesserung der Normalmesseinrichtungen für Hochdruck-Erdgas, die von der PTB auf dem Prüfstand *pigsar* der e.on Ruhrgas in Dorsten betrieben werden. Neben der Modernisierung des volumetrischen Primärnormals, der so genannten „Rohrprüfstrecke“ für Durchflüsse unter Betriebsbedingungen bis zu $400 \text{ m}^3/\text{h}$ wird zur Zeit auch intensiv an der Erweiterung des Messbereichs für große Durchflüsse bis etwa $2000 \text{ m}^3/\text{h}$ mit Hilfe eines optischen Durchflussnormals gearbeitet. Mit Laser-Doppler-Profilsensoren konnten erstmals Profile direkt am Düsenaustritt gemessen und im Bereich der Mittenströmung eine Ebenheit der Profile von 0,1 % ermittelt werden (Bild 5). Zudem wurden für zahlreiche Durchflüsse die turbulenten Grenzschichten der Düsenströmung im Reynoldszahlenbereich von $2 \cdot 10^5$ bis $1 \cdot 10^7$ gemessen. Aus der Kenntnis der Grenzschicht-Verdrängungsdicken und der Mittengeschwindigkeit lässt sich bei reduziertem

Messaufwand zukünftig der Volumendurchfluss ermitteln.

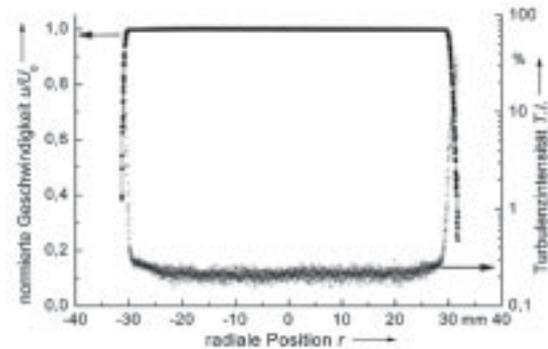


Bild 5: Mit dem Laser-Doppler-Profilsensor gemessene Geschwindigkeits- und Turbulenzverteilung im Düsenaustritt der optischen Durchfluss-Messeinrichtung.

Bei der Modernisierung der Rohrprüfstrecke und der sich anschließenden Sekundärnormale des Hochdruckprüfstandes *pigsar*TM wurde eine Reduzierung der Messunsicherheit um 0,03 % auf nun 0,13 % erreicht und durch Vergleichsmessungen mit anderen Instituten bestätigt. Hervorzuheben ist hierbei insbesondere auch die Stabilität des Prüfstandes. Seit 1993 wurden insgesamt sechs Rekalibrierungen mittels Vergleichsmessungen durchgeführt. Über den gesamten Zeitraum lag der Kalibrierwert jeweils innerhalb eines Bandes von $\pm 0,08 \%$.

Im Rahmen des DFG-Schwerpunktprogramms SPP 1147 „Bildgebende Verfahren für die Strömungsanalyse“ wurden für die Messung von Geschwindigkeitsfeldern durch die Weiterentwicklung neuer Frequenzumtastverfahren deutliche Fortschritte für die spektroskopische Doppler-Global-Messtechnik erzielt. Aktuelle Einsatzfelder sind die Analyse komplexer Strömungsfelder in Rohrleitungen und Windkanälen. Das über die ZARM-Technik AG von der ESA geförderte Projekt zur Entwicklung eines Miniatur-Zwei-Komponenten-Laser-Doppler-Anemometers für potentielle Anwendungen im Fluid Science Laboratory (FSL) der International Space Station (ISS) konnte im Juni mit der Abschlusspräsentation bei der ESTEC in Noordwijk NL erfolgreich abgeschlossen werden.

Um eine Harmonisierung der Anwendung der MID zu erreichen, wurde unter wesentli-

cher Mitarbeit des Fachbereichs der WELMEC Guide 11.1 erarbeitet, in den die langjährigen Erfahrungen aus der Zulassungs- und Konformitätsbewertungspraxis eingebracht wurden. Die MID fordert für Gasmessgeräte neuerdings die Prüfung auf Messrichtigkeit im gesamten Bereich der Nennbetriebsbedingungen, u.a. im gesamten Temperaturbereich von -40 °C bis $+80\text{ °C}$. Um Konformitätsprüfungen von Gasmessgeräten nach MID in vollem Umfang durchführen zu können und damit langfristig technische Kompetenz auf diesem Gebiet zu sichern, wurde eine entsprechende Prüfeinrichtung aufgebaut, mit der Messgeräte bis zur Baugröße G160 im gesamten geforderten Temperaturbereich mit einer relativen Messunsicherheit von $\leq 0,25\%$ untersucht werden können.

Die zunehmende Verwendung von regenerativen Quellen für Brenngas (Biogas) führte zur Erstellung einer Technischen Richtlinie zur „Einspeisung von Biogas in das Erdgasnetz“.

Am Hydrodynamischen Prüffeld (HDP) im Fachbereich *Flüssigkeiten* ist es durch experimentelle Untersuchungen und modellbasierte Berechnungen im Rahmen einer Dissertation erstmalig gelungen, die auf das Wägesystem während des Zuströmens der Flüssigkeit wirkenden dynamischen Kraftanteile zeitabhängig darzustellen und voneinander zu separieren. So können mit dem HDP künftig Momentandurchflüsse mit einer relativen Messunsicherheit von $\leq 0,05\%$ realisiert und damit nachhaltige Forderungen der Industrie – insbesondere aus den verfahrenstechnisch orientierten Bereichen – erfüllt werden.

Mit dem Ziel, die auf dem HDP mit Wasser gewonnenen Ergebnisse auch auf Flüssigkeiten mit anderen Messguteigenschaften übertragen zu können, wurden erste Verfahren entwickelt, die eine Überprüfung der verwendeten Transfornormalzähler bei deren Einsatz vor Ort bezüglich ihrer Beeinflussbarkeit durch veränderte Viskositäten ermöglichen. Um die auf dem Gebiet des Einheitentransfers notwendigen Untersuchungen künftig effizienter und in größeren Durchflussbereichen fortsetzen zu können, wurden Arbeiten zur Optimierung des Mineralölzählerprüfstandes bezüglich des Prüfablaufs (Gewährleistung des Pumpendirektbetriebes) und der

Messwerterfassung an den Normalmessbehältern (Installation eines automatischen Höhenmesssystems) begonnen.

Flüssigkeitsmessgeräte können auf unterschiedliche bzw. gestörte Geschwindigkeitsprofile mit Anzeigeänderungen bis zu vielen Prozent reagieren. Mit dem Ziel, Ähnlichkeitskriterien für diese Wechselwirkung zwischen Strömung und Messgerät für die Vielzahl von unterschiedlichen Durchflüssen, Nennweiten und Messprinzipien zu definieren und damit die Anzahl der notwendigen Untersuchungen zu begrenzen, wurden Profilmessungen mittels eines Laser-Doppler-Anemometers in einem großen Nennweitenbereich von 25 mm bis 300 mm durchgeführt. Die alleinige Verwendung bekannter Ähnlichkeitskennzahlen wie die Reynolds- oder Strouhal-Zahl ist hiernach nicht ausreichend. Größenabhängig ergeben sich zusätzliche Einflüsse: für kleine Nennweiten insbesondere durch Form- und Fertigungsqualität, für große Nennweiten vordergründig durch Laserleistung, Streuteilchenrate und -konzentration (Bild 6).

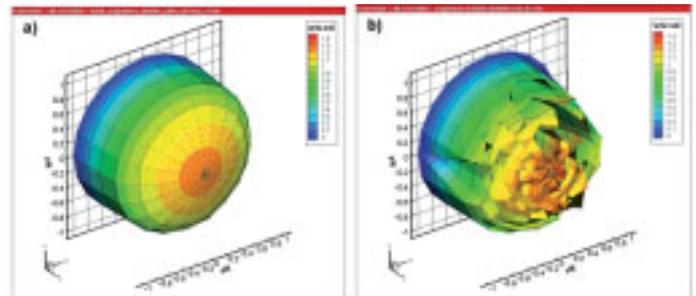


Bild 6: 3-D-Geschwindigkeitsverteilungen für eine ungestörte Strömung:

a) Nennweite 25 mm; Volumenstrom $2,5\text{ m}^3/\text{h}$; Reynolds-Zahl 35 439

b) Nennweite 300 mm; Volumenstrom $30\text{ m}^3/\text{h}$; Reynolds-Zahl 35 227

Auf Grund der wachsenden Bedeutung von Biodiesel, Bioethanol und neuerdings auch Bioheizöl wurden entsprechende Untersuchungen an Bioethanol-Benzin-Gemischen von 100/0 (100 % Ethanol zu 0 % Benzin) bis 0/100 (0 % Ethanol zu 100 % Benzin) für Temperaturen zwischen -15 °C und $+50\text{ °C}$ begonnen. Die Ergebnisse zu den wichtigsten derzeit auf dem Markt befindlichen Gemischen E80 (80 % Ethanol, 20 % Benzin) und E85 (85 % Ethanol, 15 % Benzin) wurden zeitnah veröffentlicht.

1.3 Akustik, Ultraschall und Beschleunigung

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

Die von den Fachbereichen *Kinematik* und 8.4 *Mathematische Modellierung und Datenanalyse* (Abteilung 8 *Medizinphysik und Messdatenanalyse*) entwickelten und validierten Verfahren zur modellgestützten Charakterisierung von Beschleunigungsaufnehmern sind im Rahmen eines einjährigen Technologietransfer-Projektes (MNPQ) in die industrielle Praxis überführt worden. Im Projektverlauf wurden die Algorithmen auf den Einrichtungen der Spektra Schwingungstechnik und Akustik GmbH implementiert und durch umfangreiche Vergleichsmessungen validiert.

Im Rahmen einer weiteren Industriekooperation mit der Kistler Instrumente GmbH wurde im Fachbereich *Kinematik* das Verhalten von Referenz-Beschleunigungsaufnehmern der Back-to-Back-Bauform im Detail experimentell untersucht und modelliert. Es zeigt sich, dass kleine konstruktive Details entscheiden, wie stark die Empfindlichkeit der Referenz von der Masse des Prüflings abhängt. Dieser Einfluss ist beim Transfer von der Kalibrierung der Referenz zur Kalibrierung eines Prüflings unbedingt zu berücksichtigen. Die Ergebnisse wurden im Rahmen der 34. Deutschen Jahrestagung für Akustik (DAGA) präsentiert.

Bei der laserinterferometrischen Kalibrierung von Beschleunigungsaufnehmern wird von den Kunden immer häufiger auch die Mes-

sung der Phasenverzögerung gefordert. Hierfür ist eine präzise Kenntnis der Phasenverzögerung des eingesetzten Laserinterferometers notwendig. Im Rahmen einer Diplomarbeit ist es nun erstmals gelungen, eine „über Alles“-Messung der Phasenverzögerung eines kommerziellen Laser vibrometers durchzuführen. Die Unsicherheit der realisierten Phasenmessung wurde mit weniger als $0,01^\circ$ bei 1 kHz und $0,2^\circ$ bei 20 kHz Schwingfrequenz abgeschätzt.

Die Konstruktion moderner Zweirad-Roller verleitet zahlreiche Jugendliche zu Manipulationen, mit dem gefährlichen Ziel der Erhöhung der erreichbaren Geschwindigkeit. Die Entdeckung solcher Manipulationen war der Polizei bisher nur mit Fahrversuchen auf der Straße und/oder aufwendigen gutachterlichen Untersuchungen möglich. Ein Hersteller hat in Zusammenarbeit mit Polizeidienststellen, dem Fachbereich *Kinematik* der PTB und niedersächsischen Eichbehörden ein innovatives Gerät entwickelt. Umfassende Fahrversuche mit Zweirädern unterschiedlicher Bauarten, teilweise bewusst manipuliert, zeigten, dass die rechnerische Korrektur der Reibungseffekte mit dem von der PTB inzwischen zur Eichung zugelassenen Prüfstand zu Abweichungen von maximal 5 km/h führt.

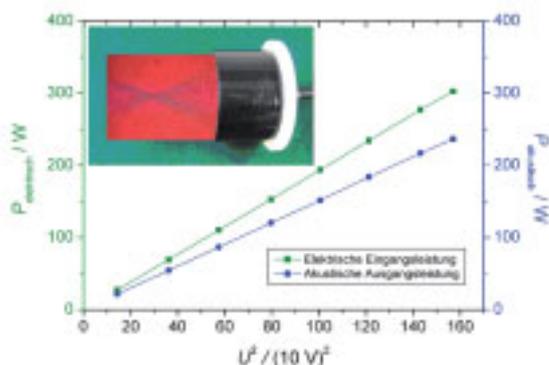
Seit inzwischen 50 Jahren erteilt die PTB in Deutschland Bauartzulassungen für Geschwindigkeitsmessgeräte zur amtlichen Überwachung des Straßenverkehrs, die einen wesentlichen Beitrag zur Verkehrssicherheit liefern. Anlässlich dieses Jubiläums wurde ein zweitägiges PTB-Seminar über Geschwindigkeitsüberwachungsgeräte organisiert, an dem über 130 in- und ausländische Teilnehmer aus verschiedenen Bereichen, wie Hersteller, Anwender, Gutachter und Eichbehörden, teilnahmen. Das PTB-Seminar war eine gute Gelegenheit, ein breites Fachpublikum über technische Neuerungen, neue Vorschriften und aktuelle Entwicklungen bei der Prüfung und Zulassung von Geschwindigkeitsmessgeräten zu informieren.

Im Fachbereich *Schall*, der sich vor allem mit Fragestellungen zur akustischen Messtechnik, dem Gehör und dem Ultraschall beschäftigt, wurden mehrere neue Themen begonnen, so zum Beispiel die Erneuerung des interfero-

metrischen Primärnormals für den Ultraschalldruck. Dabei stehen vor allem die Verbesserung der Verlässlichkeit und eine Erweiterung des Frequenzbereichs bis 100 MHz im Vordergrund.

Als eine weitere wesentliche Erweiterung eines Normalmessplatzes wurde die Bestimmung der Ultraschalleistung mit Hilfe der Schallstrahlungskraft von 20 W auf zur Zeit 350 W verbessert (Bild 7). Leistungen dieser Höhe werden von Wandlern erzeugt, die hochintensive Ultraschallfelder zur Krebstherapie zur Verfügung stellen. Bisher fehlen für solch starke Felder geeignete und rückgeführte Messverfahren, die eine quantitative Analyse ermöglichen. Sie sind für einen sicheren Betrieb der Geräte ebenso notwendig wie für eine Einschätzung der Wirkung des Ultraschalls und eine gezielte Therapieplanung. Der neue Leistungsmessplatz stellt einen ersten Schritt für die Schaffung einer metrologischen Infrastruktur für hochintensiven therapeutischen Ultraschall dar. Der Fachbereich *Schall* arbeitet hierfür intensiv in einem internationalen Projekt des Europäischen Metrologischen Forschungsprogramms (EMRP) mit, das im Berichtsjahr begonnen hat.

Die im Rahmen eines Projekts des MNPQ-Programms an Versuchspersonengruppen durchgeführten Hörschwellenmessungen zeigten, dass Signale mit unterschiedlichem Zeitverlauf, aber gleichem Spektrum, unter Verwendung konventioneller Audiometrie-Kopfhörer in statistischem Sinne gleiche Hörschwellen besitzen. Kurze „Chirps“ rufen aber größere „akustisch evozierten Potentiale“ hervor. Obwohl die Chirps nicht lauter sind, erzeugen sie deutlich größere Reaktionen des Gehirns. Zudem entfällt die Notwen-



digkeit, jedes Signal innerhalb einer Gruppe von Testsignalen, die verschiedene Phasen-, aber identische Amplitudenspektren besitzen, separat zu kalibrieren. Es genügt, die Kalibrierung für eines davon durchzuführen.

Durch einen neuen Ansatz zur Messunsicherheitsberechnung ist es im Fachbereich *Angewandte Akustik* erstmals gelungen, aus den Unsicherheitsbeiträgen der akustischen Eingangsgrößen, z. B. der Luft-Schalleistung, des Schalldämm-Maßes und des Lärm-Expositionspegels, die Unsicherheiten bauakustischer Prognoserechnungen nach DIN EN 12354-1 realitätsnah zu ermitteln. Es wird erwartet, dass dies zu einer entscheidenden Verbesserung der Akzeptanz solcher für den Schallschutz in Gebäuden wichtigen Nachweise führen wird. Außerdem wurde eine Dissertation abgeschlossen, in der der Austausch von Schwingungsenergie zwischen gekoppelten Systemen untersucht wurde. Die Ergebnisse bilden eine wertvolle Grundlage, um die Dämpfung in verbundenen Systemen in Zukunft korrekt ermitteln zu können.

Für im Berufsleben stehende Ingenieure wurde erstmalig eine dreitägige Bauakustik-Akademie zusammen mit der Deutschen Gesellschaft für Akustik (DEGA) durchgeführt (25 Teilnehmer). 120 Vertreter der anerkannten deutschen Schallprüfstellen wurden in einer weiteren, eintägigen Informationsveranstaltung auf den neuesten Stand des bauakustischen Messwesens gebracht.

Im Rahmen eines Forschungsvorhabens wurden Messungen an Prototypen für Schallschutzwände in Orchestern durchgeführt (Bild 8). Ihre Wirksamkeit im kritischen Frequenzbereich oberhalb 250 Hz wurde nachgewiesen. So konnten Pegelvermindierungen oberhalb 4 kHz um mehr als 20 dB erzielt werden. Praktische Untersuchungen zeigten, dass im Abstand von 50 cm eine

Bild 7: Gemessene akustische Leistung P eines hochintensiven fokussierenden Ultraschallwandlers im Vergleich zur eingespeisten elektrischen Leistung. U ist die an den Wandler angelegte Spannung. Das eingesetzte Bild zeigt den Wandler und eine Schlierenaufnahme des erzeugten, sich von rechts nach links ausbreitenden Schallfelds.

Beeinträchtigung des eigenen Spiels durch den Schirm kaum zu spüren ist. Erste Muster werden zur Zeit von Musikern erprobt.

Außerdem wurden die Prüfeinrichtungen für Schallpegelmessgeräte weiterentwickelt. So konnte der Prüfstand für den Einfluss mechanischer Schwingungen in seinem Anwendungsbereich auf schwere Schallpegelmessgeräte erweitert und die akustischen Prüfungen durch parallele Signalverarbeitung um den Faktor 30 verkürzt werden, ohne an Messgenauigkeit einzubüßen. Weiterhin wurde eine selbst entwickelte Druckkammer in Betrieb genommen, in der Schallpegelmessgeräte unter extremen Einsatzbedingungen (65 kPa bis 108 kPa) geprüft werden können.

Zur Nutzung der Windenergie werden zunehmend so genannte Off-shore-Anlagen auf dem Meer errichtet. So sollen z.B. in Kürze auch in der deutschen Nordsee vor Borkum zwölf 5-MW-Windräder in Betrieb gehen. Deren elektrischer Strom wird über eine Trasse von 45 km Länge an Norderney vorbei zum Festland fließen. Zur thermischen Auslegung der Seekabel muss insbesondere die Wärmeleitfähigkeit des Meeresbodens in der Verlegetiefe von zwei bis drei Meter bekannt sein. Nachdem renommierte deutsche Prüfinstitute diese Messaufgabe abgelehnt hatten, wandte sich das beauftragte Ingenieurbüro an die Arbeitsgruppe *Wärmeleitfähigkeit* im Fachbereich Angewandte Akustik. Hier wird seit einigen Jahren ein neues Messverfahren qualifiziert, das sich bereits bei seinem Einsatz an wasserhaltigen Bodenproben bewährt hat. Mit dem neuen, inzwischen patentierten Messverfahren gelang es problemlos, die Wärmeleitfähigkeit von zwölf Bodenproben aus der Nordsee zu bestimmen, und dies mit einer vergleichsweise geringen relativen Messunsicherheit von 5 %.



Bild 8: Transparenter Schallschutzschirm für Orchestermusiker mit schallabsorbierender Verkleidung. Durch die Verwendung bei Beschallung von hinten (schwarze Lautsprecherboxen) werden vor dem Schirm Schallpegelminderungen von bis zu 20 dB erreicht.

In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

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

Grundlagen der Metrologie

Messeinrichtung zur hochgenauen Kalibrierung von Temperatursensoren für deren Einsatz in strömenden Flüssigkeiten

In Durchfluss-Kalibriereinrichtungen repräsentiert die Medientemperatur eine der wesentlichen Einflussgrößen. Angepasst an die speziellen Anforderungen der Temperaturmessung im Hydrodynamischen Prüffeld wurde eine hochgenaue Kalibriereinrichtung entwickelt und aufgebaut, die unter anderem dazu dient, spezielle Widerstandsthermometer zu kalibrieren, mit denen in einer im Messstrom angebrachten Sensorgruppe die flächenförmige Temperaturverteilung im Strömungsquerschnitt quantitativ bestimmt werden soll. (A. Eggstein, FB 1.5, axel.eggstein@ptb.de)

Messung der Streuteilchenbeschleunigung in Fluiden

Für die Strömungsmodellierung, für die Abschätzung des Schlupfes von Streupartikeln und zur Partikelgrößenbestimmung ist die Kenntnis der momentanen Geschwindigkeit inklusive der Lagrangeschen Beschleunigung in turbulenten Strömungen erforderlich. Hierzu wurde die Methode der Quadratur-signaldemodulation genutzt und für beliebige Signale von Laser-Doppler-Anemometern erweitert. (V. Strunck, FB 1.4, volker.strunck@ptb.de)

Neue Bestimmung der atomaren Massenkonzante durch die Akkumulation von rund 0,3 g Wismut

Durch weitere Verbesserungen am Experiment Ionenakkumulation, insbesondere durch Verwendung eines neuen Ablenkmagneten mit verdoppelter Apertur, konnten der Wismut-Ionenstrom auf 5 mA und die akkumulierte Masse auf 325 mg erhöht werden. So konnte die atomare Massenkonzante mit einer relativen Unsicherheit von $9,4 \cdot 10^{-5}$ gemessen werden. (Ch. Schlegel, FB 1, christian.schlegel@ptb.de)

Detektor zur Messung der kinetischen Energie von Mikropartikeln im Weltraum

In Kooperation mit industriellen und universitären Partnern wurde ein Detektor zur in-situ-Messung der kinetischen Energie von einschlagenden schnellen Mikropartikeln entwickelt. Ein Array aus empfindlichen Mikrokalorimetern misst dabei die durch den Partikeleinschlag hervorgerufene Erwärmung des Absorbers. Das neuartige Messprinzip bietet, verglichen mit denen bisheriger Detektoren, wesentlich kleinere Messunsicherheiten und höhere Zuverlässigkeit. (M. Kobusch, FB 1.3, michael.kobusch@ptb.de)

Untersuchungen zur Dämpfung in der Bauakustik mit Hilfe verkleinerter Modelle

Im Rahmen einer Dissertation wurden grundlegende Untersuchungen zu Dämpfungseffekten auf dem Gebiet der Bauakustik durchgeführt. Von besonderem Interesse war dabei die Bedämpfung der Trennwand in einem Laborprüfstand, die direkt das Schalldämmmaß, die wichtigste Größe der Bauakustik, beeinflusst. (C. Kling, FB 1.6, christoph.kling@ptb.de)

Schallstrahlungskraft-Rechnungen für Ultraschallfelder rechteckiger Wandler

Es wurde die Schallstrahlungskraft-Formel für Ultraschallfelder rechteckiger Wandler berechnet, um die Ultraschall-Leistungsmessung mit Hilfe einer Schallstrahlungskraft-Waage auch für solche Feldtypen auf eine fundiertere Grundlage zu stellen. (K. Beißner, SeSc 1.60, ultrasonics@ptb.de)

Genauere Luftdichtebestimmung zur Auftriebskorrektur bei Präzisionsmassenbestimmungen

Durch den Einsatz von Auftriebskörpern und genauere Berechnungsgrundlagen für die Luftdichtebestimmung konnte die Unsicherheit der Auftriebskorrektur bei Präzisionsmassenbestimmungen deutlich reduziert werden. (M. Borys, FB 1.1, michael.borys@ptb.de)

Darstellung von Kräften zwischen 2 MN und 5 MN verbessert

In der Vergangenheit stand in der PTB zur Untersuchung von Kraftaufnehmern mit Messbereichen größer als 2 MN ausschließlich die 16,5-MN-Kraft-Normalmesseinrichtung (K-NME) zur Verfügung. Dabei kam es immer wieder zu Engpässen, da diese in ihrer Größe und Genauigkeit weltweit einmalige Maschine für Zug- und Druckkräfte auf Grund der starken Nachfrage nach Kalibrierungen in diesem oberen Kraftbereich nicht immer der Anzahl der nachgefragten Messaufgaben entsprechen konnte. Dabei betrug in der Vielzahl der Aufträge der Anteil an Aufnehmern bis zu 5 MN etwa 80 %.

Aus diesem Grund hat die PTB beschlossen, eine aus dem früheren ASMW (Amt für Standardisierung, Messwesen und Warenprüfung der DDR) übernommene hydraulische K-NME zu nutzen und diese nach einer vollständigen Modernisierung als K-NME bis 5 MN einzusetzen. Ziel war dabei eine Verringerung der Unsicherheit in der Kraftdarstellung dieser Maschine auf 0,01 %. Gleichzeitig soll die modernisierte Anlage einen effizienten, automatisierten Betrieb ermöglichen. Bei der Kaskadenregelung und dem Verfahren des Anschlusses der Maschine an die Normale wurden neue Konzepte erforscht und realisiert. (F. Tegtmeier, FB 1.2, falk.tegtmeier@ptb.de)

Metrologie für die Wirtschaft

Kalibrierung von Kraft-Vektoraufnehmern mit geringsten Unsicherheiten

Kraft-Normalmesseinrichtungen erzeugen einen Kraftvektor, dessen Richtung durch die Erdbeschleunigung bestimmt wird. Zur Kalibrierung von Kraftvektorsensoren werden verschiedene Ausrichtungen von Kraftvektoren bezüglich des Koordinatensystems des Kraftvektorsensors benötigt. Dazu wurde ein spezieller Kalibrierkörper entwickelt. Aus den Signalen der Messkanäle des Sensors und dem Kraftvektor wurde eine Übertragungsmatrix berechnet, die Aufschluss über die Signale der Einzelkomponenten gibt sowie ein Übersprechen der Kanäle anzeigt. (S. Lietz, FB 1.2, sara.lietz@ptb.de)

Entwicklung und Untersuchung von Kraftaufnehmern mit Dünnschicht-Dehnungsmessstreifen

Im Rahmen eines DFG-Forschungsprojektes in der PTB wurden Metall-Dünnschicht-Dehnungsmessstreifen (Dünnschicht-DMS) auf Kraftaufnehmer aufgesputtert und deren Verhalten untersucht. Die Verwendung von Dünnschicht-DMS verspricht in einigen Bereichen der Kraftmessung Vorteile gegenüber den üblicherweise eingesetzten Folien-DMS. (A. Buß, FB 1.2, andre.buss@ptb.de)

Neue dynamische Messverfahren für die Industrie

Im August 2008 ist das vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) geförderte Projekt „Modellgestützte Kalibrierung von Beschleunigungsaufnehmern“ erfolgreich abgeschlossen worden. Ziel des Projektes war es, die in den letzten Jahren in der PTB entwickelten, neuartigen Messverfahren und Auswertemethoden zur Kalibrierung von Beschleunigungsaufnehmern in die Industrie zu überführen. (Th. Bruns, PTB FB 1.3, thomas.bruns@ptb.de; C. Elster, PTB FB 8.4, clemens.elster@ptb.de; H. Nicklich, SPEKTRA Schwingungstechnik und Akustik GmbH Dresden)

Untersuchungen an Silizium-Wägezellen mit Dünnschicht-Dehnungsmessstreifen

Wägezellen (WZ) mit einkristallinen Federkörpern (FK) und aufgesputterten Dehnungsmessstreifen (DMS) lassen aufgrund der ideal elastischen Eigenschaften des FKs ein geringes Zeitverhalten und eine hohe Reproduzierbarkeit der Messsignale erwarten. Damit wären diese Sensoren optimal für den Einsatz in mechatronischen Systemen geeignet, um weitere Einflussfaktoren wie Temperaturabhängigkeiten und Nichtlinearitäten digital zu kompensieren. Untersuchungen eines FKs aus Silizium (Si) haben das im Vergleich zu metallischen FK um den Faktor 100 geringere Zeitverhalten bestätigt. Derzeit werden die Si-WZ bezüglich Linearität, Hysterese und Reproduzierbarkeit der Messsignale untersucht. Erste vergleichende Messungen an metallischen- und Si-Wägezellen bestätigen die besseren Eigenschaften der Si-WZ. (S. Mäuselein, FB 1.1, sascha.mauselein@ptb.de)

Metrologie für die Gesellschaft

Prüfeinrichtung für Temperatureinflüsse auf das Messverhalten von Gasmessgeräten

Eine neue Prüfeinrichtung für Gasmessgeräte mit Temperierung der Prüfluft zwischen -40 °C und $+80\text{ °C}$ wurde 2008 in Betrieb genommen und erste Reihenuntersuchungen an Laminardurchflusssensoren wurden im Rahmen einer Diplomarbeit erfolgreich durchgeführt. (R. Kramer, FB 1.4, rainer.kramer@ptb.de)

Unsicherheit bauakustischer Prognosewerte

Durch einen neuen Ansatz zur Messunsicherheitsberechnung ist es erstmals gelungen, aus den Unsicherheitsbeiträgen der akustischen Eingangsgrößen die Unsicherheiten bauakustischer Prognoserechnungen nach DIN EN 12354-1 realitätsnah zu ermitteln. Es wird erwartet, dass dies zu einer entscheidenden Verbesserung der Akzeptanz solcher für den Schallschutz in Gebäuden wichtigen Nachweise führen wird. (V. Wittstock, FB 1.7, volker.wittstock@ptb.de)

PTB entwickelt Schallschutz für Orchester- musiker

Die EU Richtlinie 2003/10/EG definiert erhöhte Anforderungen an den Schutz von Arbeitnehmern vor der Gefährdung durch Lärm. Die Umsetzung in die Praxis, die bis zum 15. Februar 2008 europaweit gefordert wurde, stellt besonders für Musiker im Sinfonieorchester ein ernstzunehmendes Problem dar. (I. Bork, FB 1.7, ingolf.bork@ptb.de)

Sechs Semester Bauakustik in drei Tagen

Personen, die schon im Berufsleben stehen, finden oft nicht die Zeit, sich die Grundlagen eines Fachgebiets anzueignen, in das sie der Beruf „verschlagen“ hat. So stellen viele Ingenieure irgendwann fest, dass sie mit Akustik zu tun haben, ohne es jemals richtig gelernt zu haben. In diese Lücken springen die Akademien der Deutschen Gesellschaft für Akustik. Diese Akademien verfolgen das Ziel, Personen, denen im Berufsalltag die Zeit fehlt, in kurzen, aber intensiven Lehrgängen in Fachgebiete der Akustik einzuarbeiten. Im Juni fand in der PTB in Braunschweig eine solche Akademie mit dem Thema „Bauakustik“ statt. (W. Scholl, FB 1.7, werner.scholl@ptb.de)

Hörschwellen für neue Kurzzeitsignale: Gleichheit der Hörschwelle für Click- und Chirpsignale gezeigt

Click- und Chirp-Signale mit identischem Amplitudenspektrum haben für die audiometrische Praxis gleiche subjektive Hörschwellen. Dies kann die Kalibrierung wesentlich vereinfachen. (J. Hensel, FB 1.6, johannes.hensel@ptb.de)

Temperatur-Mengenbewertung von Ethanol-Benzin Gemischen

Um die Durchführung gesetzlich geforderter Temperatur-Mengenbewertung auch bei Biokraftstoffen und Gemischen von Biokraftstoffen und konventionellen Kraftstoffen zu ermöglichen, hat die PTB erste Untersuchungen des Temperatur-Dichteverhaltens dieser Flüssigkeiten durchgeführt. (H. Wolf, FB 3.3, henning.wolf@ptb.de, M. Rinker, FB 1.5, michael.rinker@ptb.de)

Internationale Angelegenheiten

Erster weltweiter Drehmomentvergleich mit sehr guten Ergebnissen abgeschlossen

Der im Jahre 2005 begonnene internationale Vergleich („Key comparison“) CCM.T-K1 für Drehmomente von $500\text{ N} \cdot \text{m}$ und $1\text{ kN} \cdot \text{m}$ wurde mit der Abstimmung des Berichts zwischen den Teilnehmern abgeschlossen. Dabei konnten die von den Partnern jeweils angegebenen erweiterten ($k = 2$) Messunsicherheiten von bestenfalls $2 \cdot 10^{-5}$ bestätigt werden, womit auch gezeigt wäre, dass die Darstellung statischer Drehmomente mit kleinsten Messunsicherheiten beherrscht wird. (D. Röske, FB 1.2, dirk.roeske@ptb.de)

Beginn eines neuen Zyklus des Europäischen Harmonisierten Kubikmeters für Hochdruck-Erdgas

Nach turnusgemäßer Rekalibrierung aller beteiligten Prüfeinrichtungen von Deutschland, der Niederlande und Frankreich wurde ein neuer Zyklus zur Pflege des Europäischen Harmonisierten Kubikmeters für Hochdruck-Erdgas erfolgreich gestartet. (B. Mickan, FB 1.4, bodo.mickan@ptb.de)

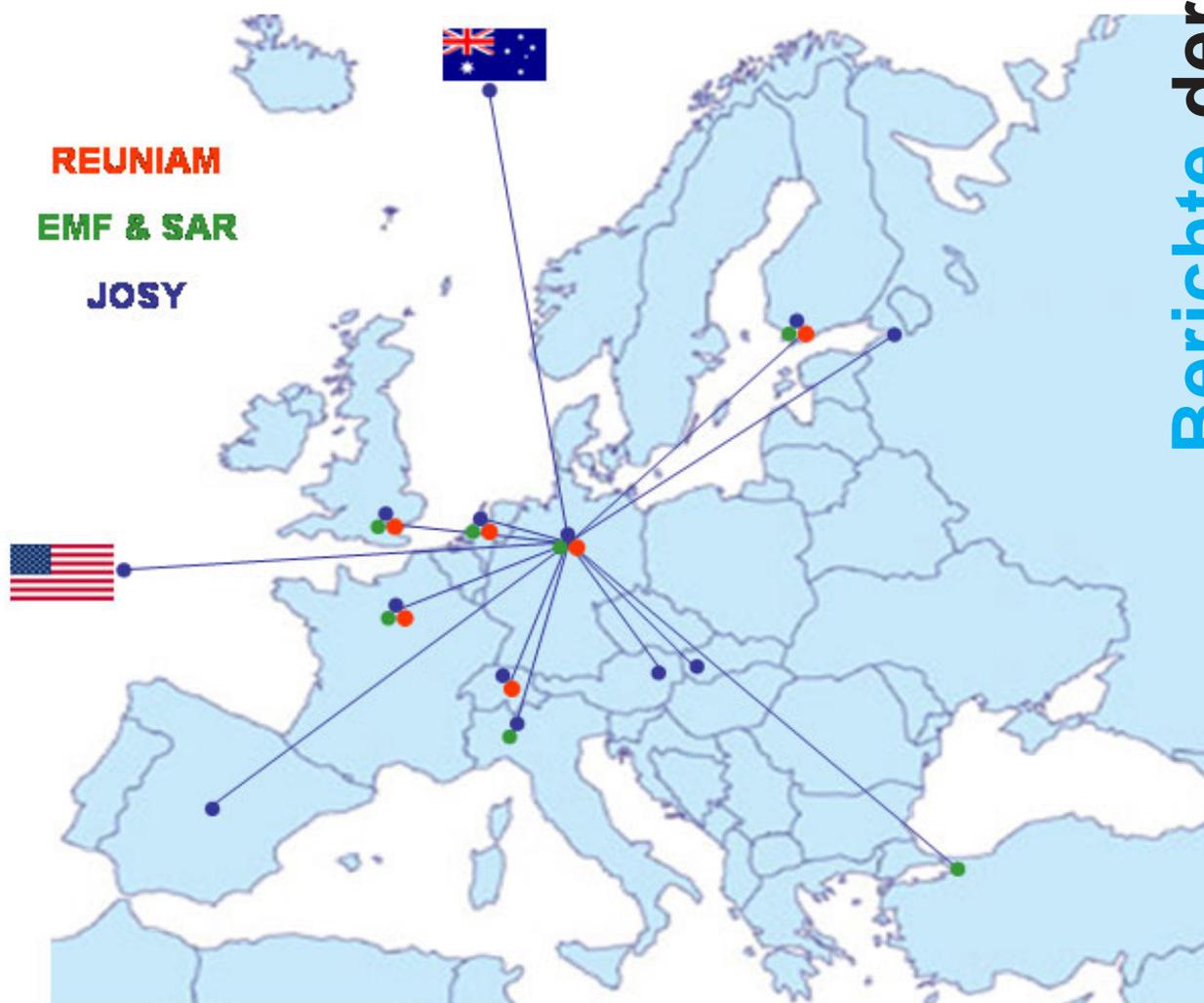
Vergleichskalibrierung eines schweren Triaxial-Geschwindigkeitsaufnehmers

Die spezifizierte Qualität eines Schwingererregers kann durch parasitäre Querbewegungen als Folge der Belastung durch den zu kalibrierenden Prüfling stark beeinträchtigt werden. Masse, Baugröße, Steifigkeit und mechanische Ankopplung des Sensors haben Einfluss auf die Güte der gewünschten – i. A. uniaxialen – Schwingbewegung. Auf Anfrage des METAS (Schweiz) wurde ein für die dortige Kalibriereinrichtung sehr großer und schwerer Triaxial-Geschwindigkeitsaufnehmer auf dem für höhere Lasten ausgelegten Mehrkomponenten-Schwingererregers der PTB vergleichend kalibriert. Mittels laserinterferometrischer Erfassung der Referenz- und Störgrößen konnte gezeigt werden, dass sich der Einfluss störender Rotationsbewegungen rechnerisch weitgehend kompensieren lässt. (M. Kobusch, FB 1.3, michael.kobusch@ptb.de)

Neuer WELMEC-Leitfaden 2.8 für selbsttätige Waagen (SW) verabschiedet

Seit mehreren Jahrzehnten werden elektronische Waagen zunächst als nichtselbsttätige Waagen (NSW) geprüft und zur Eichung zugelassen und später wird auch deren Zulassung als selbsttätige Waagen (SW) beantragt. In der Vergangenheit zeigte sich, dass die europäischen benannten Stellen zum Teil einer unterschiedlichen Philosophie bei der Behandlung solcher Anträge folgten. Bedenklich war, dass die spezifischen messtechnischen Probleme von SW zum Teil völlig außer Acht gelassen wurden. (K. Schulz, FB 1.1, karsten.schulz@ptb.de)

Elektrizität



Berichte der Abteilungen

Abteilung

Elektrizität

Forschung und Entwicklung im Bereich der Metrologie spielen sich in zunehmenden Maße auf der europäischen Ebene ab. Die im Rahmen einer ERA-NET-PLUS-Aktion durch die EU geförderten *Joint Research Projects (JRP)* sind zu Beginn des Jahres 2008 angelaufen. Die Abteilung ist an 6 von insgesamt 21 bewilligten Projekten beteiligt, drei dieser Projekte werden von Mitarbeitern der Abteilung koordiniert (siehe Titelbild). EURAMET steht in Verhandlungen mit der Kommission der EU über eine noch weitergehende Förderung der Metrologie im Rahmen einer Art.-169-Aktion. Im Vordergrund stehen dabei Querschnittsprojekte, die fachübergreifend bearbeitet werden müssen. Die Energiemess-technik ist als erstes zu förderndes Querschnittsthema ausgewählt worden, und die Abteilung beteiligt sich sowohl innerhalb der PTB als auch in den entsprechenden Gremien von EURAMET aktiv an den Vorbereitungen zu diesem Thema.

Die elektrische Energiemess-technik ist auch einer der Themenschwerpunkte, den die Abteilung *Elektrizität* bearbeitet. Quantennormale, Nanomagnetismus und Hochfrequenzmesstechnik sind die weiteren Schwerpunkte, für die die Abteilung die ihr zur Verfügung stehenden Ressourcen einsetzt, unterstützt durch eingeworbene Drittmittelprojekte, die eine willkommene Verstärkung und Bereicherung unserer Arbeit darstellen. Im Folgenden wird über Fortschritte auf diesen Arbeitsgebieten berichtet.

Titelbild:

Zusammenarbeit auf dem Gebiet der Metrologie in Europa – die von der Abteilung Elektrizität koordinierten Joint Research Projekte

REUNIAM	Foundations for a redefinition of the SI base unit ampere
JOSY	Next generation of quantum voltage systems for wide range applications
EMF & SAR	Traceable measurement of field strength and SAR for the Physical Agents Directive

Quantennormale

Die Arbeiten an Quantennormalen für die elektrische Stromstärke haben große Bedeutung im Hinblick auf die für 2011 geplante Redefinition dieser Einheit auf der Grundlage der Elementarladung. Dazu werden Schaltungen für den Einzelelektronentransport auf metallischer und halbleitender Basis untersucht. Die bislang entwickelten Schaltungen haben den Nachteil, dass sie nur Stromstärken unter 1 pA mit für die Präzisionsmesstechnik relevanter Genauigkeit erzeugen und damit einer direkten Messung nicht zugänglich sind. Daher zielten die Untersuchungen auf eine Erhöhung der Pumpfrequenz bis in den GHz-Bereich und eine Parallelisierung von Strukturen bei gleichzeitig niedriger Fehlerrate ab (Bild 1). Bei den metallischen Strukturen konzentrierten sich die Arbeiten auf hybride SNS-Turnstiles (Supraleiter-Normalleiter-Supraleiter), die Anregung von 2e-Solitonen in Ketten kleiner Josephson-Kontakte sowie die Nutzung des Quantum-Phase-Slip-Effekts in supraleitenden Nano-drähten. Bei den halbleitenden Strukturen verschiebt sich der Arbeitsschwerpunkt von der Optimierung der Betriebsbedingungen zur Parallelisierung. Untersuchungen zum spinpolarisierten Einzelelektronentransport werden zur Zeit aufgenommen.

Die Messung der kleinen Stromstärken erfolgt indirekt mit dem *Electron Counting Capacitance Standard*. Bei diesem Experiment wird ein Kondensator mit einer bekannten Anzahl von Elektronen geladen und die dabei entstehende Spannung mit einem Josephson-Spannungsnormale verglichen. Durch Rückführung der Kapazität auf die von-Klitzing-Konstante kann die Konsistenz der drei fundamentalen elektrischen Quanteneffekte (Quanten-Hall-, Josephson- sowie Einzelelektronen-Effekt) überprüft werden. Im Berichtsjahr wurden gute Fortschritte bei der Zuverlässigkeit der Ladungspumpen sowie deren Integration in die Messschaltung er-

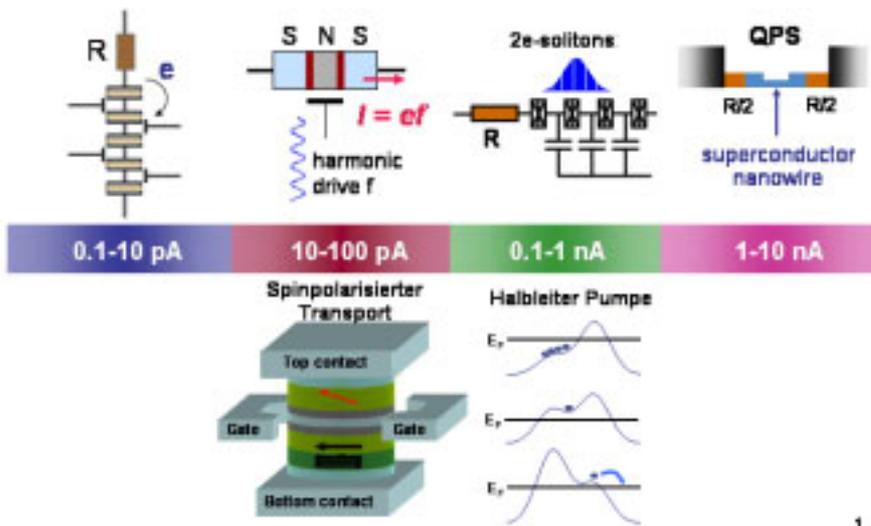


Bild 1: Schaltungen für den Einzelelektronentransport auf metallischer und halbleitender Basis

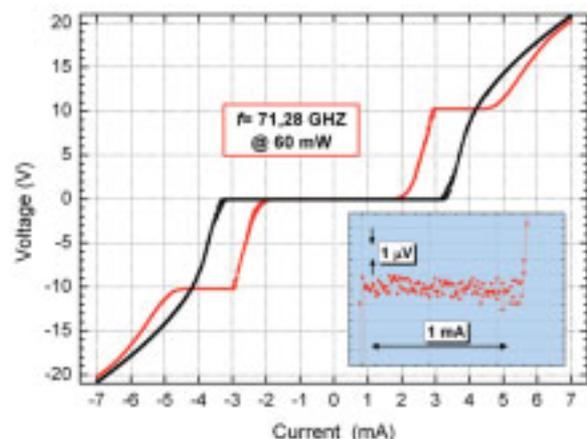
zielt. Sowohl im statischen als auch im dynamischen Betrieb konnten Speicherzeiten von > 10 min (statisch) bzw. ca. 2 s (dynamisch) erreicht werden, die internationale Spitzenwerte darstellen.

Bei den binär geteilten Josephson-Arrays ist der PTB in Zusammenarbeit mit dem NIST, USA, ein Durchbruch gelungen. Bisher konnten solche Arrays für Spannungen von 10 V nur in SINIS-Technologie (Supraleiter-Isolator-Normalleiter-Isolator-Supraleiter) hergestellt werden. Im Berichtsjahr ist es nun erstmalig gelungen, solche Arrays auch in der sehr viel robusteren SNS-Technologie herzustellen (Bild 2, siehe auch Rubrik „Nachrichten des Jahres“). Binär geteilte Josephson-Arrays verkörpern Digital-Analog-Wandler mit fundamentaler Genauigkeit und wurden bereits mit Erfolg in der Impedanz- und Leistungsmesstechnik sowie beim AC/DC-Transfer eingesetzt. Da sich die binär geteilten Arrays insbesondere für Anwendungen bei niedrigen Frequenzen eignen, wurden auch die Arbeiten an pulsgetriebenen Josephson-Spannungsnormale zur Erzeugung beliebiger Wellenformen bei höheren Frequenzen fortgesetzt.

Die Bemühungen, mit Reihen- und Parallelschaltungen von Quanten-Hall-Proben eine Quanten-Widerstandsskala aufzubauen, sind ein gutes Stück vorangekommen. Erstmals wurden in der PTB Quanten-Widerstandsnormale aus doppelagigen GaAs-Schichten

Bild 2: Kennlinie des weltweit ersten programmierbaren 10-V-Arrays in SNS-Technologie (Supraleiter – Normalleiter – Supraleiter)

hergestellt, die, wie Präzisionsmessungen bestätigt haben, einen Widerstandswert vergleichbar dem von einlagigen Strukturen aufweisen. Damit ist die Grundlage geschaffen worden, aus diesen gestapelten Doppelstrukturen vertikal integrierte Parallelschaltungen mit halbierten Zahl von QHE-Elementen herzustellen. Parallel dazu wird an lateralen Arrays aus QHE-Elementen weitergearbeitet, wobei hier eine Erhöhung der Ausbeute im Vordergrund steht. Mit dem Nachweis, dass Quanten-Hall-Widerstände mit geringer Unsicherheit auch bei Wechselstrom zu verwenden sind, lässt sich die Messkette zur bewahrten Kapazitätseinheit deutlich vereinfachen. Im Berichtszeitraum standen Untersuchungen zu den Verlustmechanismen in den Proben im Vordergrund, die für die Frequenzabhängigkeit des AC-QHE verantwortlich sind. Durch geeignete Konditionierung und Schirmung der Proben konnten diese Verluste jetzt so weit reduziert werden, dass sich Quanten-Hall-Proben bis zu Frequenzen von einigen kHz für Präzisionsmessungen einsetzen lassen.



Die Abteilung hat Arbeiten an Graphen aufgenommen mit dem Ziel, Quanten-Hall-Widerstandsnormale unter einfacheren Betriebsbedingungen (höhere Temperaturen und kleinere Magnetfelder) zu realisieren. Dabei geht es vorrangig um die Herstellung geeigneter Proben durch Rekrystallisation von SiC oder die Exfoliation von Graphit sowie deren Charakterisierung durch Bestimmung der Morphologie und der Anzahl der Atomlagen. An Graphenproben vom MPI für Festkörperphysik in Stuttgart sind erste Messungen des Quanten-Hall-Widerstandes durchgeführt worden (Bild 3).

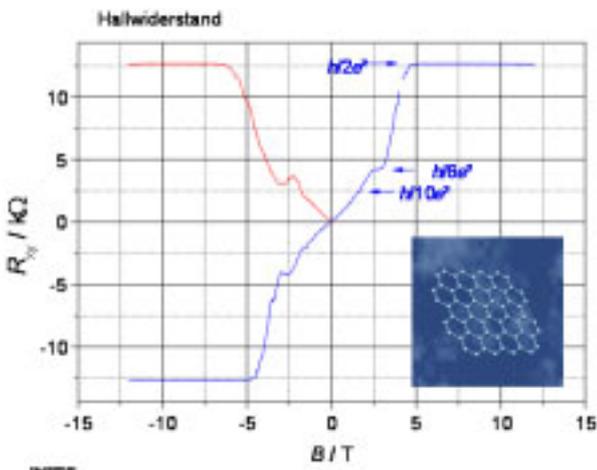


Bild 3: An Graphen gemessene Kennlinie des Quanten-Hall-Effekts (rote Kennlinie: Elektronenleitung, blaue Kennlinie: Löcherleitung)

Nanomagnetismus

Die heute üblichen schnellen Computerspeicherchips wie DRAM und SRAM haben einen entscheidenden Nachteil: Bei Unterbrechung der Stromversorgung gehen die darauf gespeicherten Informationen unwiderruflich verloren. Abhilfe könnte das MRAM schaffen – das **M**agnetic **R**andom **A**ccess **M**emory. In einem MRAM wird die digitale Information nicht in Form elektrischer Ladungen gespeichert, sondern über die Richtung der Magnetisierung in magnetischen Speicherzellen. Die neueste Generation der MRAMs basiert auf dem so genannten Spin-Torque-Effekt (Bild 4). Da Spin-Torque-MRAMs auch eine sehr hohe Speicherdichte versprechen, wird weltweit intensiv an ihrer Entwicklung gearbeitet. In der PTB konnte jetzt erstmals der physika-

lisch schnellstmögliche Schaltprozess einer solchen magnetischen Speicherzelle realisiert werden. Mit Hilfe dieses ballistischen Schaltprozesses können nichtflüchtige Magnet-speicherzellen genauso schnell umgeschaltet werden wie die schnellsten flüchtigen Speicherbauteile.

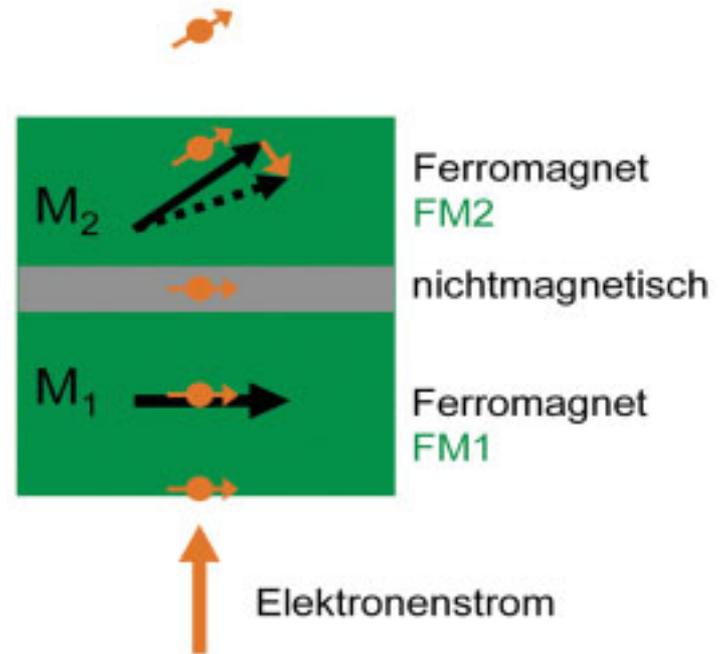


Bild 4: Strominduzierte Magnetisierungsumkehr in einer Spin-Torque-Speicherzelle

Magnetische Nanopartikel werden häufig als Biomarker oder als Träger medikamentöser Wirkstoffe zum Beispiel in der Krebstherapie eingesetzt. Eine der Aufgaben des Fachgebiets Nanomagnetismus ist es, die magnetischen Eigenschaften solcher Partikel zu bestimmen. Im Berichtsjahr wurde der Einfluss externer Störfelder auf die magnetische Struktur von Filmen aus magnetischen Nanopartikeln mit der Methode der Magnetkraftmikroskopie und mit numerischer Simulation untersucht. Dabei zeigte sich, dass externe Störfelder die Gleichgewichtsdomänenstruktur in dünnen Filmen auslöschung können, wobei Multilagenfilme stabiler sind als Monolagenfilme. Solche Störfelder treten zum Beispiel auf, wenn magnetische Strukturen mit der magnetischen Spitze eines Magnetkraftmikroskops abgerastert werden. Diese Untersuchungen zeigen, dass bei der Interpretation von magnetischen Abbildungen die Wechselwirkung zwischen Messobjekt und Messsonde sorgfältig beachtet werden muss.

Elektrische Energiemesstechnik

Die Aktivitäten der Abteilung auf dem Gebiet der elektrischen Energiemesstechnik sind auf drei Ziele ausgerichtet: Entwicklung hochgenauer Primärnormale für elektrische Leistung und Energie, Bereitstellung der erforderlichen Messtechnik für eine Steigerung der Qualität und Effizienz der elektrischen Energieversorgung und metrologische Absicherung neuer Entwicklungen wie zum Beispiel *Smart Metering*, *Smart Grids*, elektrische Antriebe im Verkehr und andere.

Bei dem auf einem Abtastverfahren beruhenden Primärnormal für die elektrische Leistung konnte das Abtastvoltmeter unmittelbar auf ein Josephson-Spannungsnormale rückgeführt werden. Dazu wurde es direkt mit einem auf einem Josephson-Synthesizer basierenden Quanten-Voltmeter verglichen. Die Messunsicherheit des Primärnormals wird jetzt hauptsächlich durch die Messwandler bestimmt, die die dem Prüfling zugeführte Spannung und Stromstärke auf Werte herabsetzen, die mit dem Abtastvoltmeter mit hoher Genauigkeit gemessen werden können. Eine Kalibrierung des Voltmeters mit Hilfe eines Wechsel-Gleich-Transfers ergab eine Übereinstimmung besser als $1 \mu\text{W}/\text{VA}$. Um die geringe Unsicherheit des Primärnormals für die Weitergabe der Einheit sowie internationale Vergleiche nutzen zu können, wurde ein TransfERNormal entwickelt, mit dem die elektrische Leistung dreiphasig in einem weiten Wertebereich für Spannung, Stromstärke und Phase dargestellt werden kann. Eine zum Patent angemeldete Frequenzsynchronisation erlaubt den universellen Einsatz dieses Normals ohne besondere Anforderungen an die Frequenzstabilität am Einsatzort zu stellen. Ein weiteres speziell für internationale Vergleiche entwickeltes Normal wurde im Hinblick auf gute Langzeitstabilität sowie geringe Abmessungen und Gewicht optimiert.

Verfahren und Algorithmen zur Messung der Qualität und Effizienz der elektrischen Energieversorgung werden im Rahmen von Vorhaben untersucht. Im Rahmen eines europäischen Verbundvorhabens entwickelt die Abteilung mit 15 ausländischen Partnern die nächste Generation der Messverfahren für Leistung und Energie. Im Vordergrund steht dabei die Messung hochgradig verzerrter,

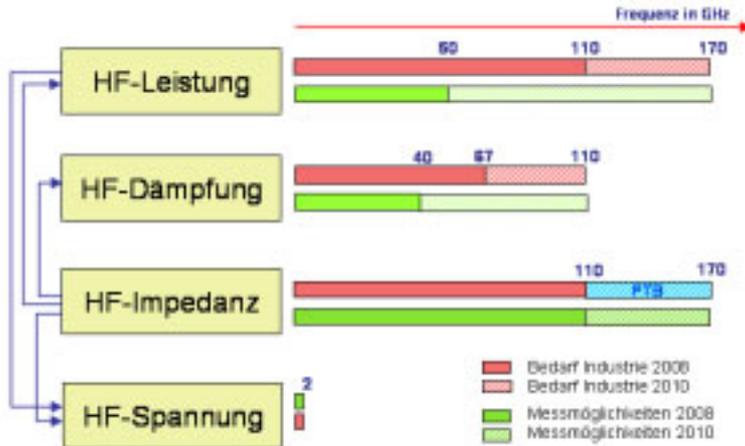
nicht-stationärer Kurvenformen. Der Beitrag der PTB konzentriert sich auf die Entwicklung genauer Abtastmethoden und Algorithmen zur Analyse der Netzqualität sowie der rückgeführten Messung von Parametern der Netzqualität. Für die Bundesnetzagentur wird zur Zeit ein Power-Quality-Normal aufgebaut, das der Überprüfung von Messgeräten zur Kontrolle der Qualität der Versorgungsspannung in elektrischen Netzen über einen weiten Werte- und Frequenzbereich dienen soll.



Bild 5: Vorstellung des E-Mobility-Projekts in Berlin (v.l.n.r.: RWE-Vorstandsvorsitzender Großmann, Bundeskanzlerin Merkel, VDA-Präsident Wissmann, Daimler-Chef Zetsche, Quelle: ActionPress)

Die Öffnung der Schienenwege für neue Anbieter sowie der grenzüberschreitende Verkehr von Hochgeschwindigkeitszügen erfordern, eine Messtechnik, die den Energieverbrauch elektrischer Bahnen unter den verschiedenen Betriebsbedingungen zu messen gestattet. Dabei sind unterschiedliche Versorgungsspannungen und Frequenzen zu berücksichtigen. In Zusammenarbeit mit der DB-Energie entwickelt die Abteilung einen Messplatz für Traktionsenergie, wobei Sensorik und Messdaten-Kommunikation unter den gegebenen Bedingungen im Vordergrund stehen. Eine Renaissance erleben auch elektrische Antriebe in batteriebetriebenen Kraftfahrzeugen (Bild 5). Neben der Logistik stehen hier Fragen der Energiemesstechnik im Fahrzeug selbst oder an den Übernahmestellen im Vordergrund.

Bild 6: Ausbau der HF-Basismessgrößen zu höheren Frequenzen



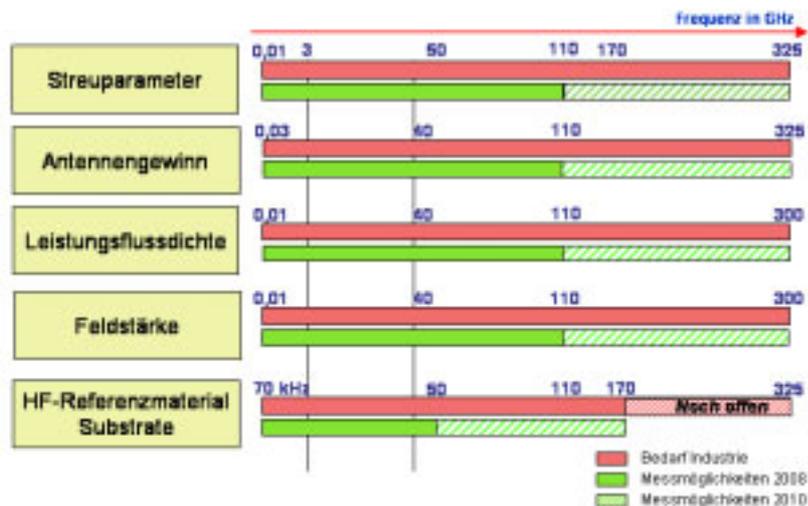
Hochfrequenzmesstechnik

Die Abteilung hat mit Unterstützung durch die Dienststelle im Berichtsjahr begonnen, den Hochfrequenzbereich zu konsolidieren und auszubauen, um damit den Anforderungen aus der Industrie besser Rechnung tragen zu können (Bild 6). Die zur Zeit bestehenden Messmöglichkeiten für HF-Leistung bis zu Frequenzen von 50 GHz sollen schrittweise bis 170 GHz erweitert werden. Dämpfungsmessungen können zur Zeit bis 40 GHz durchgeführt werden, ein Ausbau bis 110 GHz ist vorgesehen. Für Impedanz bestehen zur Zeit Messmöglichkeiten bis 40 GHz, die auf Frequenzen bis zu 170 GHz ausgeweitet werden sollen.

Parallel dazu wurde der Hochfrequenzbereich personell verstärkt, zum Teil mit eigenem Personal und darüber hinaus durch Vorhaben in Kooperation mit der HF-Industrie.

Als Beispiel sei ein in Zusammenarbeit mit der Arbeitsgruppe *Datenanalyse und Messunsicherheit* neu entwickeltes, mathematikgestütztes Verfahren zur hochgenauen Kalibrierung von Vektornetzwerkanalysatoren (VNA) genannt. Das Verfahren beruht auf nur einer einzigen VNA-Messung mit einer Präzisions-Luftleitung. Die Restfehlerkenngrößen des VNA werden dann anhand dieser Messung über den gesamten Frequenzbereich mit einem mathematischen Verfahren ermittelt. Mit deren Kenntnis lassen sich die Errorboxeinträge korrigieren und somit die Systemfehler von VNA deutlich verringern. Durch Vergleich mit einer aufwendigen, etablierten Referenzmethode wurde das neue

Bild 7: Ausbau der Messmöglichkeiten für Feldgrößen und Materialparameter



Kalibrierverfahren experimentell bestätigt. Es ermöglicht nun in einfacher Weise die hochgenaue Kalibrierung von VNA sowie die Funktionsprüfung mechanischer Kalibriersätze und elektronischer Kalibriereinheiten.

Parallel dazu wurde im Rahmen des Querschnittprojekts *Terahertz-Metrologie* der Ausbau bis in den Sub-THz-Bereich fortgesetzt, wobei für die Aktivitäten des Fachbereichs *Hochfrequenz und Felder* nach Absprache mit der Abteilung *Temperatur und Synchrotronstrahlung* 325 GHz als obere Frequenzgrenze festgelegt wurden. Streuparameter und Feldmessgrößen werden zur Zeit bis 110 GHz abgedeckt. Durch bereits bewilligte oder eingeleitete Beschaffungen soll der Frequenzbereich für diese Messgrößen bis auf 325 GHz ausgedehnt werden. Für die Materialparameter bestehen Messmöglichkeiten bis 50 GHz, die in nächster Zeit bis auf 170 GHz erweitert werden sollen. Mit den in Angriff genommenen Maßnahmen kann der Bedarf der Hochfrequenzindustrie auch mittelfristig gedeckt werden.

Aufgrund des zunehmenden Bedarfs an freier Bandbreite wird in letzter Zeit vermehrt über kurzreichweitige Kommunikationssysteme bei Frequenzen von 300 GHz und darüber nachgedacht. Mit der Modellierung solcher Terahertz-Kommunikationssysteme und der Erforschung der Eigenschaften des Übertragungskanals befassen sich die Wissenschaftler des *Terahertz Communications Lab*, eines Verbundes aus drei Arbeitsgruppen der Technischen Universität Braunschweig und der Arbeitsgruppe *Elektromagnetische Felder* der PTB. Die PTB wirkt dabei an der Entwicklung von Messtechnik für zukünftige Komponenten und Systeme mit. Im Rahmen dieser Arbeiten wurde ein 300-GHz-Übertragungssystem aufgebaut, mit dem die Übertragungseigenschaften von Terahertz-Kommunikationssystemen untersucht werden sollen. Weltweit erstmalig wurde damit ein Videosignal bei einer Frequenz von 300 GHz über eine Entfernung von 22 m übertragen. Damit konnte gezeigt werden, dass die Übertragung von Nutzdaten mit THz-Wellen möglich ist.

In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

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

Grundlagen der Metrologie

Verbesserung der Kohärenzeigenschaften von supraleitenden Phasen-Qubits durch den Einsatz geeigneter Isolationsmaterialien

Durch den Einsatz von Si_3N_4 anstelle von SiO_2 als Isolator in supraleitenden Quantenschaltungen konnte die Kohärenzzeit für Rabi-Oszillationen signifikant von 5 ns auf 15 ns erhöht werden. (R. Dolata, FB 2.4, ralf.dolata@ptb.de)

Integration von π -Kontakten in Josephson-Qubits und Einzelflussquanten-Strukturen
SFS- und SIS-Josephsonkontakte (S Supraleiter, F Ferromagnet, I Isolator) konnten durch eine Zusammenarbeit zwischen der PTB und dem ISSP in Chernogolovka, Russland, erfolgreich integriert werden, indem die SFS-Kontakte am ISSP auf in der PTB vorbereiteten Nb-Schaltungen hergestellt wurden. (M. Khabipov, FB 2.4, marat.khabipov@ptb.de)

Erzeugung beliebiger AC-Wellenformen mit hoher Genauigkeit mit dem pulsgetriebenen AC-Josephson-Spannungsnormale

Beliebige AC-Wellenformen mit großer Unterdrückung der höheren Harmonischen bis zu -112 dBc konnten mit dem pulsgetriebenen AC-Josephson-Spannungsnormale JAWS (Josephson Arbitrary Waveform Synthesizer) generiert werden. (O. Kieler, FB 2.4, oliver.kieler@ptb.de)

Optimierung des Messsystems für das pulsgetriebene AC-Josephson-Spannungsnormale

Das Messsystem für das pulsgetriebene AC-Josephson-Spannungsnormale für beliebige Wellenformen (JAWS : Josephson Arbitrary Waveform Synthesizer) sowie die zur Ansteuerung erforderlichen binären Pulscodes konnten entscheidend verbessert werden. Damit ist das System jetzt einsatzbereit für die Charakterisierung synthetisierter Wellenformen. (O. Kieler, FB 2.4, oliver.kieler@ptb.de)

Neues EU-Projekt S-PULSE: Potential der Supraleiterelektronik für künftige Technologien

Im Rahmen des 2008 gestarteten EU-Projekts S-PULSE wird das Potential der Supraleiterelektronik im Hinblick auf Technologie-Generationen jenseits der CMOS-Skalierungsgrenzen ausgelotet. (J. Kohlmann, FB 2.4, johannes.kohlmann@ptb.de)

Replikation von Gitterstrukturen für organische Festkörperlaser mittels Nanoimprintlithographie

Im Rahmen eines Verbundprojektes stellt die PTB Resonatorstrukturen für organische Festkörperlaser mittels Elektronenstrahl-lithographie her. Die optische Rückkopplung des Lasers erfolgt dabei durch eine periodische Strukturierung (Distributed Feedback). Mit Hilfe von Nanoimprintlithographie konnten diese Gitterstrukturen abgeformt werden. (M. Lehnhardt, FB 2.4, marcus.lehnhardt@ptb.de)

Einzelladungstransport in hybriden SNS Turnstiles

Bei der Untersuchung sog. hybrider Turnstiles auf Basis von zwei in Reihe geschalteten Supraleiter-Normalleiter-Tunnelkontakten im Hochfrequenz-Betrieb bis ca. 1 GHz wurde eine deutliche Verringerung der Leckrate in SNS-Strukturen im Vergleich zu NSN-Strukturen gemessen. Ein seriell eingebauter Widerstand konnte zwar unerwünschte subgap-Tunnelprozesse eindämmen, verlangsamte aber gleichzeitig den Einzelelektronen-Transfer. (S. Lothkov, FB 2.4, sergey.lothkov@ptb.de)

Programmierbare 10V-SNS-Spannungsnormale für 70 GHz mit hochohmigen $\text{Nb}_x\text{Si}_{1-x}$ -Josephson-Barrieren

In Kooperation mit dem NIST (Boulder, USA) wurden erstmalig programmierbare 10V-Spannungsnormale für 70 GHz unter Verwendung von SNS-Josephsonkontakten hergestellt. Neben einer höheren Ausbeute bei der Herstellung konnte gezeigt werden, dass die Leistungsparameter der SNS-Schaltungen deutlich die der entsprechenden 10V-SINIS-Schaltungen übertreffen. (F. Müller, FB 2.4, franz.mueller@ptb.de)

Elektrische Charakterisierung getemperter quervernetzter Molekülmonolagen

In Zusammenarbeit mit der Universität Bielefeld wurden die elektrischen Transporteigenschaften organischer „Nanoblätter“ untersucht. Die Untersuchung ihrer elektrischen Eigenschaften soll einen detaillierten Einblick in die Physik der elektrischen Transportprozesse innerhalb dieser Graphen-ähnlichen Schichten erlauben. (D. H. Weber, FB 2.4, dirk.h.weber@ptb.de)

Minituarisierung eines Hochfrequenz-Einzel-Ladungs-Elektrometers mit hoher Bandweite

Ein Einzel-Cooper-Paar-Elektrometer mit einer Ladungsauflösung von $1,2 \cdot 10^{-4} e/\sqrt{\text{Hz}}$ bei einer Bandbreite von bis zu 20 MHz und Größe von lediglich $5000 \mu\text{m}^2$ wurde erfolgreich realisiert. (M. Wulf, FB 2.4, michael.wulf@ptb.de)

Erweiterung der Quanten-Ohm-Skala durch vertikale Integration – Der Quanten-Hall-Effekt im Doppelpack

Erstmals wurden in der PTB Quanten-Widerstandsnormale aus doppelagigen GaAs-Schichten hergestellt, die bei Präzisionsmessungen einen Widerstandswert vergleichbar dem von Einzel-Normalen aufweisen. Damit ist die Grundlage geschaffen worden, aus diesen gestapelten Doppelstrukturen vertikal integrierte Parallelschaltungen mit halbiertes Zahl von QHE-Elementen herzustellen, um gewünschte Widerstandswerte unterhalb von $R_K/2 = 12906 \Omega$ zu realisieren. (K. Pierz, FB 2.5, klaus.pierz@ptb.de)

Rennstrecke für schnelle Elektronen in Halbleiterstrukturen

Die PTB hat eine neue Molekularstrahl-epitaxie-Anlage in Betrieb genommen, die für die Herstellung von ultrareinen Halbleiterschichten optimiert ist. Schon in den ersten Testschichten wurden extrem schnelle Elektronen beobachtet, mit einer Beweglichkeit, die mehr als fünfmal so hoch ist wie bisher. Die PTB baut damit ihre führende Stellung in der elektrischen Quantenmetrologie mit Halbleiterstrukturen aus. (K. Pierz, FB 2.5, klaus.pierz@ptb.de)

Geschwindigkeitsrekord für Magnet-speicher

Ballistisches Schalten macht schnelle Speicher mit „Gedächtnis“ möglich. Ein auf dieser Basis arbeitendes Magnetic Random Access Memory (MRAM) schaltet genauso schnell wie die bisher eingesetzten flüchtigen Halbleiterspeicher. (H.W. Schumacher, FB 2.5, hans.w.schumacher@ptb.de)

Stabilität der Domänenstruktur in Filmen aus magnetischen Nanopartikeln

Der Einfluss externer Störfelder auf die magnetische Struktur von Filmen aus magnetischen Nanopartikeln wurde mit Magnetkraftmikroskopie und mit numerischen Simulationen untersucht. Es zeigt sich, dass externe Störfelder die Gleichgewichtsdomänenstruktur in dünnen Filmen auslöschen können, während Multilagenfilme stabiler sind als Monolagenfilme. (S. Sievers, FB 2.5, sibylle.sievers@ptb.de)

Robuste Halbleiter-Einzelelektronenpumpe

Mit Hilfe der Nanotechnik wurde eine neuartige Quanten-Stromquelle realisiert, in der einzelne Elektronen im Takt von externen Spannungspulsen transportiert werden. Das Besondere dieser „Elektronenpumpe“ ist die hohe Robustheit des physikalischen Transportvorgangs, bei dem die genaue Höhe des treibenden Spannungspulses keine Rolle mehr spielt. Da die Pumpe darüber hinaus nur eine einzige solche Taktspannung benötigt, ergibt sich erstmals die Möglichkeit, viele Pumpen parallel zu betreiben. Die Stromstärke könnte damit auf ein praktisch nutzbares Niveau erhöht werden. (B. Kästner, FB 2.5, bernd.kaestner@ptb.de)

Rein optisch erzeugte Spannungsimpulse auf koplanaren Wellenleitungen

Der PTB ist es gelungen, mit rein optischen Verfahren ultrakurze Spannungsimpulse auf koplanaren Wellenleitungen zu erzeugen. Das Besondere an diesem Verfahren besteht darin, dass keine externe Spannung an die Wellenleitung angelegt werden muss. Bisher konnte eine ähnliche Technik nur für in den freien Raum abgestrahlte Terahertz-Pulse angewandt werden. Die neuen Experimente sind wichtig, um Quellen von ultrakurzen Spannungsimpulsen und von Terahertz-Strahlung besser verstehen und modellieren zu können. (M. Bieler, FB 2.5, mark.bieler@ptb.de)

Neue Technik zur Erzeugung und Messung ultrakurzer Spannungsimpulse

Die PTB hat eine neue Technik entwickelt, die es ermöglicht, ultrakurze Spannungsimpulse mit Laserimpulsen der gleichen Wellenlänge im gleichen Material zu erzeugen und zu messen. Die Spannungsimpulse werden dabei durch Anregung von Urbach-Ausläufern unterhalb der Bandkante des Halbleitermaterials erzeugt und mittels des elektrooptischen Effekts des Halbleitermaterials detektiert. Die neue Technik vereinfacht bisherige Verfahren zur Erzeugung und Detektion ultrakurzer Spannungsimpulse deutlich. (M. Bieler, FB 2.5, mark.bieler@ptb.de)

Verschiebbahnhof für einzelne Elektronen – darf es ein Elektron mehr sein?

Kontrollierter Transfer von einzelnen Elektronen in einer elektrischen Schaltung nachgewiesen. (H. Scherer, FB 2.6, hansjoerg.scherer@ptb.de)

Experiment zum „Quantenmetrologischen Dreieck“ auf der Zielgeraden Entscheidende Fortschritte im Einsatz von Einzelelektronen-Schaltungen für das Quanten-Kapazitätsnormal.

(H. Scherer, FB 2.6, hansjoerg.scherer@ptb.de)

Graphen – das Quanten-Ohm im Bleistiftstrich

Das neue Material Graphen, im Prinzip in jedem Bleistiftstrich enthalten, könnte in der Zukunft die Basis für ein Normal des elektrischen Widerstands werden. (F. J. Ahlers, FB 2.6, franz.ahlers@ptb.de)

Der AC-Quanten-Hall-Widerstand als Quantennormal der Kapazität

In der PTB wurde sowohl ein besseres Verständnis des AC-Quanten-Hall-Widerstandes erzielt als auch erstmalig ein daraus abgeleitetes, präzises Quantennormal für die Kapazität realisiert. (J. Schurr, FB 2.6, juergen.schurr@ptb.de)

Modellierung und Messfehleranalyse von stufenförmig synthetisierten Josephson-Sinusschwingungen

Fehler, die aus den Übergängen zwischen quantisierten Spannungswerten bei stufenförmig synthetisierten Sinussignalen resultieren, können durch Modellierung und Modellvergleich mit dem Experiment besser verstanden werden. (J. Lee, FB 2.6, jinnie.lee@ptb.de)

Metrologie für die Wirtschaft

Neue Präzisionsverstärker erweitern die Messmöglichkeiten bei Wechselstromstärke zu kleineren Stromstärken hin

Die Messmöglichkeiten für den Wechsel-Gleich-Transfer sind durch den Leistungsbedarf der verwendeten Thermokonverter zu kleinen Signalen hin begrenzt. Nachdem gute Erfahrungen mit neu entwickelten Präzisionsverstärkern beim Transfer kleiner Wechselspannungen vorlagen, wurden diese Verstärker für den Stromstärketransfer weiterentwickelt. Damit können Stromstärken bis hinab zu 10 μA bei Frequenzen von 10 Hz bis 100 kHz mit erweiterten Messunsicherheiten von nicht mehr als 50 $\mu\text{A}/\text{A}$ kalibriert werden. (T. Funck, FB 2.1, torsten.funck@ptb.de)

Ultrastabiler Generator für AC-QHR-Quadraturbrücke

Es wurde ein neuer, ultrastabiler Signalgenerator für die Quadraturbrücke der PTB entwickelt, mit der die Verbindung vom Quanten-Hall-Effekt zur Kapazitätseinheit Farad realisiert wird. (G. Ramm, FB 2.1, guenther.ramm@ptb.de)

Weltweit erste Videoübertragung mit Terahertz-Wellen

Im Rahmen aktueller Arbeiten wurde ein 300-GHz-Übertragungssystem auf Basis von Schottky-Diodenmischern aufgebaut, mit dem die Übertragungseigenschaften von Terahertz-Kommunikationssystemen untersucht werden sollen. In einem Demonstrationsexperiment konnte weltweit erstmalig die Übertragung eines Videosignals bei einer Frequenz von 300 GHz über eine Entfernung von 22 m demonstriert werden. Damit konnte gezeigt werden, dass die Übertragung von Nutzdaten mit THz-Wellen möglich ist. (T. Kleine-Ostmann, FB 2.2, thomas.kleineostmann@ptb.de)

Mathematikgestützte Kalibrierung von Vektornetzwerkanalysatoren

Ein neues, mathematikgestütztes Verfahren zur hochgenauen Kalibrierung von Vektornetzwerkanalysatoren (VNA) wurde in Zusammenarbeit der Abteilungen *Elektrizität* und *Medizinphysik und metrologische Informationstechnik* entwickelt. (R. Judaschke, G. Wübbeler, C. Elster, FB 2.2, 8.4, rolf.judaschke@ptb.de, gerd.wuebbeler@ptb.de, clemens.elster@ptb.de)

Dreiphasiges Abtastnormal für die elektrische Wechselleistung mit verbesserter Frequenzauflösung

Ein neues Abtastnormal für die elektrische Wechselleistung für den Frequenzbereich von 16 Hz bis 5 kHz wurde in der PTB entwickelt, mit dem Ziel, die Messunsicherheit bei Kalibrierungen auf unter 10 $\mu\text{W}/\text{VA}$ (für Netzfrequenzen) zu reduzieren. Dieses System verwendet kaskadierte Direkt-Digital-Synthesizer für die Triggerung und Synchronisierung von Analog-Digital-Umsetzern mit einer Auflösung von einigen 10^{-9} Hz. Spezielle Spannungs- und Stromwandler erweitern die Messbereiche bis zu 480 V und 10 A. (W. G. Kürten-Ihlenfeld, FB 2.3, guilherme.ihlenfeld@ptb.de)

Wie sicher sind Elektrizitätszähler gegen äußere elektromagnetische Störeinflüsse?

Ein neuer Messplatz erlaubt die Simulation äußerer elektromagnetischer Störungen und die Untersuchung ihres Einflusses auf Elektrizitätszähler als Teil der Konformitätsbewertung von Zählern. (H. Seifert, FB 2.3, helmut.seifert@ptb.de)

Messplatz zur Kalibrierung von E-Feldsonden

Ein modernisierter Normalmessplatz für die Kalibrierung von Feldstärkemessgeräten für elektrische Felder von 10 V/m bis 40 kV/m bei Frequenzen von 15 Hz bis 30 kHz steht jetzt für Kalibrierungen zur Verfügung. (R. Marx, FB 2.3, rainer.marx@ptb.de)

Vor-Ort Kalibrierung von dreiphasigen Trennstromwandlern mit Hilfe von Leistungskomparatoren

Zur Kalibrierung von Trennstromwandlern wurde ein Messverfahren entwickelt, das es erlaubt, die erforderlichen Messungen mit geringem Aufwand in den Prüfstellen vor Ort durchzuführen. Der Messbereich erstreckt sich von 50 mA bis 120 A. Die erreichbaren Messunsicherheiten liegen im Bereich von 0,005 % für die Stromwandlermessabweichung und 0,01 crad für den Phasenfehlerwinkel. (E. Mohns, FB 2.3, enrico.mohns@ptb.de)

Verringerung der Messunsicherheit bei der Weitergabe der Einheit Tesla im Bereich von 20 μT bis 2 mT

Die Messunsicherheit bei der Weitergabe der Einheit Tesla im Bereich von 20 μT bis 2 mT konnte durch den Einsatz eines neuen Auswertungsverfahrens um den Faktor zwei reduziert werden. (M. Albrecht, FB 2.5, martin.albrecht@ptb.de)

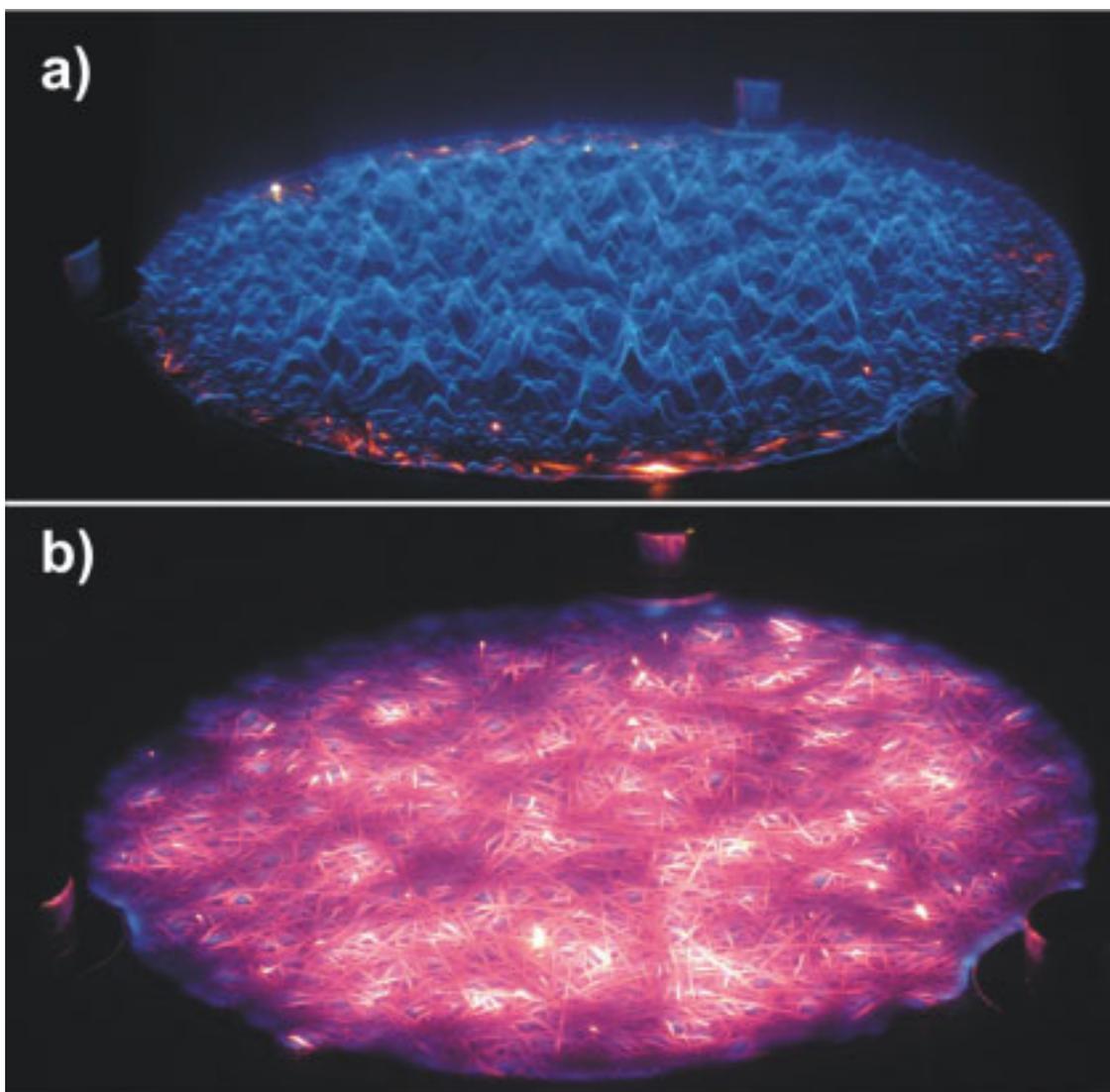
Verbesserung des Abtast-Quantenvoltmeters

Ein AC-Quanten-Voltmeter misst Wellenformen im Wechselspannungsbereich durch Vergleich mit einer synthetisierten Josephson-Wellenform. Das erreichbare Signal-Rausch-Verhältnis wurde durch Verwendung einer höheren Josephson-Spannung und durch Nutzung eines Vorverstärkers verbessert. (R. Behr, FB 2.6, ralf.behr@ptb.de)



Chemische Physik und Explosionsschutz

Berichte der Abteilungen



Chemische Explosionss

Die Abteilung 3 *Chemische Physik und Explosionsschutz* ist zuständig für die Bearbeitung der Themenbereiche *Metrologie in der Chemie und Stoffeigenschaften* sowie *Physikalische Sicherheitstechnik und Explosionsschutz*.

Darüber hinaus leistet die Abteilung 3 Beiträge zum Querschnittsthemebereich *Durchfluss* (siehe Bericht der Abteilung 1) sowie zu den Projekten *Avogadrokonstante* (siehe Bericht der Abteilung 4) und *Boltzmannkonstante* (siehe Bericht der Abteilung 7).

Der Themenbereich *Physikalische Sicherheitstechnik und Explosionsschutz* wird in den vier Fachbereichen 3.4 *Grundlagen des Explosionsschutzes*, 3.5 *Zünddurchschlagsprozesse*, 3.6 *System- und Eigensicherheit* und 3.7 *Zündquellensicherheit* bearbeitet. Die diesjährige Berichterstattung widmet sich schwerpunktmäßig den Entwicklungen im Explosionsschutz.

Forschung und Entwicklung, Prüfdienstleistungen und Beratung der PTB auf dem Gebiet des Explosionsschutzes erfolgen in enger Abstimmung mit der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) im Rahmen des Projektes *Chemisch-physikalische Sicherheitstechnik*.

Entwicklungen im Explosionsschutz

Der Prozess der europäischen Harmonisierung der (staatlichen) Regelungen im Explosionsschutz ist mit den Richtlinien 94/9/EG und 1999/92/EG schon seit einiger Zeit abgeschlossen. Das unterstützende CEN-CENELEC-Arbeitsprogramm ist nahezu vollständig erarbeitet. Für elektrische Geräte findet die technische Normenentwicklung fast ausschließlich auf IEC-Ebene statt. Im Bereich der heutigen CEN-Normen ist dieser internationale Harmonisierungsprozess mit Gründung des IEC SC 31 M, das ISO/IEC-Normen erarbeiten wird, gerade angelaufen.

Zur Konkretisierung der Betriebssicherheitsverordnung, die in Deutschland die RL1999/92/EG umsetzt, werden seit einigen Jahren Technische Regeln für Betriebssicherheit erarbeitet.

Auch bei der Einstufung und Kennzeichnung gefährlicher Stoffe und Güter steht ein weltweiter Harmonisierungsprozess kurz vor seinem Abschluss. Das „Globally Harmonized System of Classification and Labelling of Chemicals“ (GHS) wird zur Zeit auf den europäischen und deutschen Bereich übertragen und hat einige Auswirkungen u. a. für die Einstufung brennbarer Flüssigkeiten.

Auf allen Ebenen und in vielen Gremien dieser nationalen, europäischen und internationalen Normen- und Regelerarbeitung haben PTB-Mitarbeiter aus den vier Fachbereichen des Explosionsschutzes entscheidend und zum Teil in leitender Funktion teilgenommen.

Titelbild:

Verbrennung auf einer Dauerbrandsicherung mit einer Flammensperre aus gesinterten Fasern mit unterschiedlichen Anströmgeschwindigkeiten (a: 0,73 m/s, b: 0,04 m/s)

Physik und Schutz

Unterstützung der Wirtschaft durch anwendungsbezogene Forschung und Entwicklung

Die PTB unterstützt die Wirtschaft durch Forschungs- und Entwicklungsarbeiten, die Herstellern und Betreibern von explosionsgeschützten Geräten und autonomen Schutzsystemen erlauben, neue wissenschaftlich-technische Entwicklungen und Erkenntnisse des Explosionsschutzes zeitnah umzusetzen.

Einfluss der Umschließung auf die Zündtemperatur brennbarer Flüssigkeiten

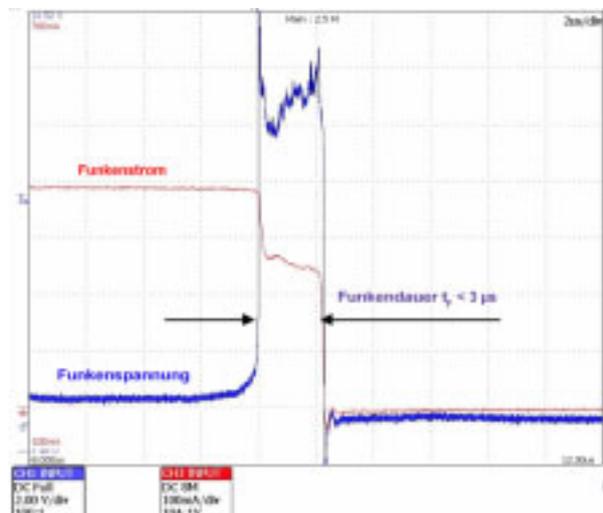
Untersuchungen zum Druckeinfluss auf die Zündtemperatur ergaben, dass in bestimmten Fällen die Art der Umschließung der explosionsfähigen Atmosphäre zu einer deutlichen Absenkung der Zündtemperatur gegenüber der Norm-Zündtemperatur führt, ohne dass eine nennenswerte Erhöhung des Gemischausgangsdruckes oder des Gemischvolumens vorliegen muss. Diese Erkenntnisse geben den Berufsgenossenschaften wichtige Anhaltspunkte bei der Beurteilung der Zündung explosionsfähiger Atmosphäre durch heiße Oberflächen.

Innovative Technologie führt zu deutlicher Leistungserhöhung in der Zündschutzart „Eigensicherheit“

Die Zündschutzart „Eigensicherheit“ weist gegenüber anderen Schutzarten zahlreiche Vorteile auf. Allerdings steht dabei selten mehr als eine Leistung von 3 W zur Verfügung, bedingt durch das Wirkprinzip der „Eigensicherheit“, der Begrenzung der zur Verfügung stehenden elektrischen Leistung.

Bild 1: Beeinflussung eines Öffnungsfunkens durch Schnellabschaltung

Mit dem neuartigen dynamisch wirkenden eigensicheren Energieversorgungskonzept DART (Dynamic Arc Recognition and Termination) lassen sich erheblich höhere Leistungswerte – bis zu 50 W – unter Beibehaltung der Grundsätze der Eigensicherheit erzielen. Das Wirkprinzip basiert auf einer sehr schnellen Erkennung von Stöorzuständen (z. B. Zündfunken) durch Auswertung der damit verbundenen (dynamischen) Stromänderungen mit der unmittelbar folgenden Überführung des Systems in einen sicheren Zustand (z. B. durch Abschaltung). Das sicherheitsrelevante Zeitfenster für die Beeinflussung des Vorganges ergibt sich hierbei aus der Funkendauer möglicher zündfähiger Funken. Dabei erfolgt die Überführung in den sicheren Zustand so schnell, dass der Funken nicht zündwirksam werden kann. Der Funken wird somit bereits während seiner Entstehungsphase sicher zeitbegrenzt. Bild 1 zeigt beispielhaft einen bereits in der Entstehungsphase durch Abschaltung beeinflussten Öffnungsfunken.



Auf Grund der starken gegenseitigen Abhängigkeiten von Energieversorgung, Leitung und Verbrauchern (z. B. Feldgeräte, Magnetventile) ist nach heutigem Kenntnisstand nur eine Zertifizierung solcher Einheiten als Gesamtsystem sinnvoll. Allerdings ist die Bewertung dynamisch wirkender eigensicherer Leistungsquellen auf Basis der zurzeit gültigen internationalen Norm IEC 60079-11 nicht möglich, da sie für dynamische eigensichere Stromkreise keine angemessene Anforderungen enthält. Daher sind neue normativ anwendbare Prüfmethode zu erarbeiten. Die dazu erforderlichen Untersuchungen sind noch nicht abgeschlossen.

Die bisher vorliegenden Ergebnisse der PTB resultieren aus vom Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit (über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen e. V. AiF) und von einem deutschen Industriekonsortium geförderten Projekten, die zu zwei für bestimmte Anwendungsbereiche optimierten DART-Realisierungsansätzen geführt haben. Der erste Ansatz zielt auf allgemein anwendbare leistungsstarke eigensichere Energieversorgungen (DART für High-Power-Anwendungen), um in einer Punkt-zu-Punkt-Verbindung eine möglichst hohe Leistung bereitzustellen. Der zweite Ansatz (DART für Feldbusanwendungen) ist dagegen für Feldbusanwendungen mit verteilter, dezentraler Topologie und großen Leitungslängen optimiert.

Beide Konzepte wurden auf der INTERKAMA 2008 und in der „Automatisierungstechnischen Praxis“ (atp) vorgestellt sowie in einem PTB-Workshop diskutiert. Es ergab sich, dass die deutsche Industrie an der weiteren Ausgestaltung dieser innovativen Technologie starkes Interesse hat. Dabei besitzt die Erarbeitung geeigneter Anforderungen für die internationalen (IEC-)Normen eine zentrale Bedeutung. Für die Industrie ist die Unterstützung durch die PTB bei der Vorgabe sicherheitsrelevanter Parameter und der Implementierung der entsprechenden Anforderungen in Normen besonders wichtig.

Einsatz von RFID-Transpondern in explosionsgefährdeten Bereichen

Mit dem ständig wachsenden Informationsbedarf (z. B. für Qualitätssicherungsmaßnahmen und die Fertigungssteuerung) wird vermehrt die RFID (Radio Frequency Identification)-Technologie in der Industrie eingesetzt.

Ein RFID-System besteht aus Reader (Lesegerät) und Transponder (Datenspeicher). Zum Betrieb eines Transponders wird stets ein Reader benötigt. Die Energieversorgung in einem System mit einer Arbeitsfrequenz von z. B. 13,56 MHz geschieht über das vom Reader erzeugte HF-Feld. Der Transponder wird hierbei ausschließlich im magnetischen Nahfeld (closed coupling) des Readers betrieben. Ein passiver Transponder besteht prinzipiell aus einem LC-Resonanzkreis, der auf die Arbeitsfrequenz abgestimmt ist, einer Gleichrichtung mit Ladekondensator und einem Chip mit Datenspeicher. Aktive Transponder sind zusätzlich mit einer Batterie zur Speisung des Chips ausgestattet. Zum Einsatz in explosionsgefährdeten Bereichen (wie in der Prozessindustrie) existieren bereits einige bauartgeprüfte RFID-Systeme, Reader und Transponder.

Für den Einsatz von Transpondern, z. B. zukünftig als elektronisches Typschild, ist ein ständig wachsendes Angebot verfügbar. Ein Ziel des NAMUR-Arbeitskreises 4.16 ist es, Bedingungen zu definieren, unter denen der Einsatz der Transponder in explosionsgefährdeten Bereichen möglich ist, ohne dass diese eine potenzielle Zündquelle darstellen. In Zusammenarbeit mit der PTB wurde untersucht, welche Zündquellen bei RFID-Transpondern wirksam werden können.

Dazu mussten Bedingungen definiert werden, unter denen passive RFID-Transponder nicht als potenzielle Zündquellen betrachtet werden müssen. Transponder werden üblicherweise in Kunststoffen verkapselt. Viele Transponder sind zu klein, um eine Gefährdung durch elektrostatische Aufladungen zu bewirken, jedoch sind insbesondere bei Labeln (Transponder in Klebeetiketten) elektrostatische Aufladungen zu beachten. Bei Zerstörung des Transpondergehäuses können elektrische Schaltkreise freigelegt werden, bei üblichen Transpondern mit einer Resonanz-

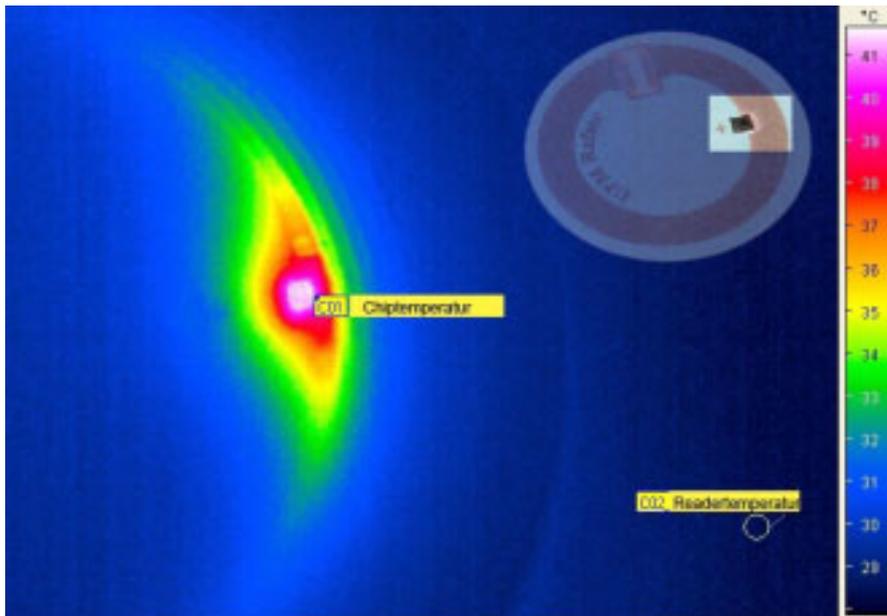


Bild 2: Oberflächentemperatur eines passiven Transponders

frequenz von 13,56 MHz sind aber die Reaktanzen zu gering, um zündfähige Funken erzeugen zu können. Eine zündfähige elektromagnetische Strahlung war für die untersuchten Transponder nicht gegeben, da sie keine autarke Sendeeinrichtung darstellen. Als Hauptproblem wurde die Erwärmung des Transponders durch die eingekoppelte Leistung untersucht. Eine nennenswerte Erwärmung konnte jedoch nur beobachtet werden, wenn die Transponder betriebsmäßig mit einem Reader angesteuert wurden (Bild 2).

Es konnten deshalb für passive Transponder der Arbeitsfrequenz 13,56 MHz bestimmte Bedingungen festgelegt werden, um diese gefahrlos in explosionsgefährdete Bereiche einbringen zu können. Reader und batteriegespeiste Transponder werden dagegen grundsätzlich als potentielle Zündquellen angesehen und müssen daher die Anforderungen des Explosionsschutzes erfüllen.

Kleine heiße Bauteile als potentielle Zündquellen

Die zur Zündung eines Brennstoff/Luft-Gemisches notwendige Oberflächentemperatur hängt stark von der Geometrie der Oberfläche ab. Daher ist es zulässig, dass die Temperatur kleiner Bauteile unter bestimmten Voraussetzungen die Zündtemperatur der betreffenden explosionsfähigen Atmosphäre überschreitet. Die Zündunwirksamkeit ist durch eine Zündprüfung an den kleinen

Bauteilen unter Betriebsbedingungen nachzuweisen.

Im Rahmen eines Forschungsprojektes wurde zusammen mit einem Hersteller elektrischer Geräte systematisch untersucht, wie die Zündfähigkeit kleiner heißer Bauteile mit einer Bauteiloberfläche $< 3 \text{ mm}^2$ (Bild 3) bei der Konstruktion explosionsgeschützter Geräte berücksichtigt werden kann. Die Zündfähigkeit solcher Bauteile kann unterbunden werden, wenn in ihrer unmittelbaren Umgebung andere Geräteteile den Übergang der Oberflächenreaktionen in eine sich selbst erhaltende Flammenausbreitung in das Prüfgemisch hinein verhindern. Wichtig ist dabei nicht nur die Kühlung des Prüfgemisches in direkter Umgebung des heißen Bauteils, sondern auch die freie Konvektion des Gasgemisches an der Außenseite des heißen Bauteils. Durch geeignete konstruktive Maßnahmen ist es bei Berücksichtigung dieser Ergebnisse möglich, die Zündung des Prüfgemisches durch die kleinen heißen Bauteile sicher zu verhindern, ohne die gewünschte Funktion des elektrischen Gerätes zu beeinflussen.

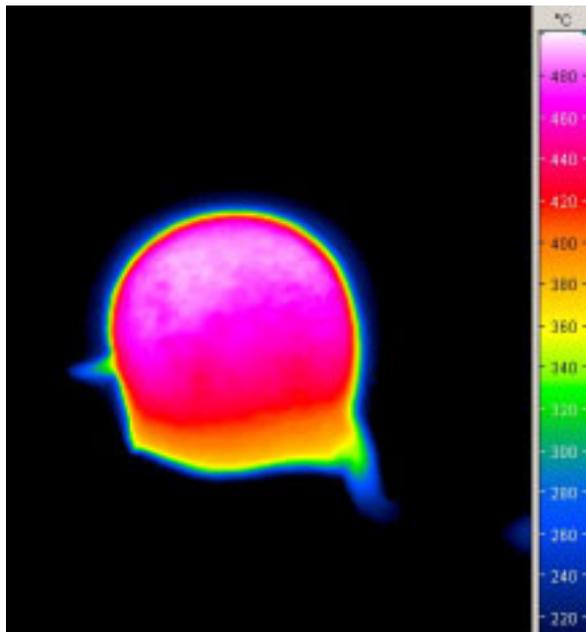


Bild 3: Thermographiebild eines kleinen heißen Bauteils (Oberfläche = 2,7 mm²)

heit“ ist eine Kombinationsprüfung des Motors ausschließlich mit dem Umrichter typ erforderlich, mit dem er später betrieben werden soll. Dies führt u. a. dazu, dass ein defekter Umrichter häufig den eigentlich unnötigen Austausch des Motors erforderlich macht, wenn ein baugleicher Umrichter nicht mehr erhältlich ist. Daher wird bei Neuanlagen oft auf den Umrichterbetrieb verzichtet, obwohl dies aus Energieeffizienzgründen nicht sinnvoll ist. Stattdessen wird z. B. bei einer Pumpe die Förderleistung mittels einer Bypassleitung mit sehr geringen Systemwirkungsgraden eingestellt. Bild 4 stellt beide Varianten gegenüber.

Neues Explosionsschutzkonzept für umrichter gespeiste Antriebe der Zündschutzart „Erhöhte Sicherheit“

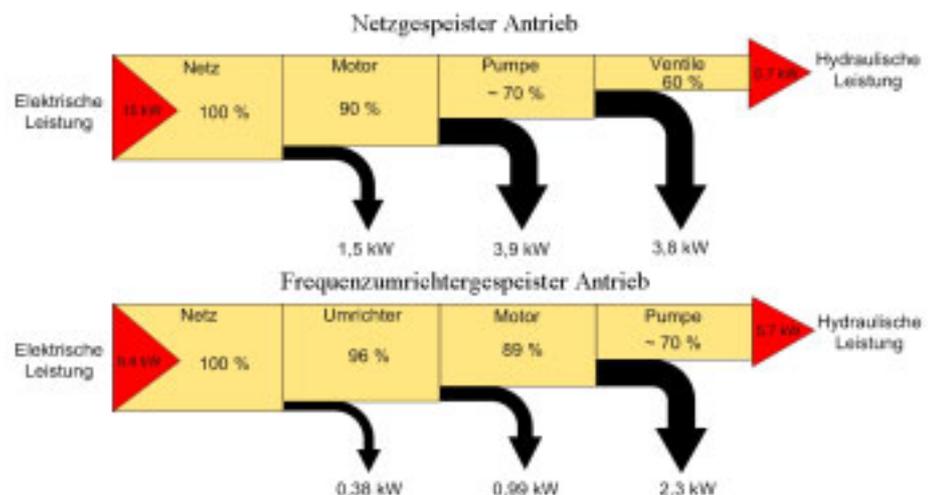
Frequenzumrichter gespeiste Antriebe ergeben gegenüber netz gespeisten Motoren wesentliche Vorteile wie große Energieeinsparung beim Antrieb von Strömungsmaschinen, Steigerung der Produktqualität durch Optimierung des Produktionsprozesses, Verlängerung der Anlagenlebensdauer, Verringerung der Netzurückwirkungen durch Spannungseinbrüche beim Hochlauf größerer Motoren sowie Einsparungen durch den oftmals möglichen Verzicht auf ein Getriebe.

Auch für chemische und petrochemische Anlagen besteht der Wunsch, frequenzumrichter gespeiste Antriebe flexibel und kostengünstig in explosionsgefährdeten Bereichen einzusetzen. Bei dem bisher angewandten Prüf- und Zertifizierungskonzept für die Zündschutzart „Erhöhte Sicher-

Das in der PTB entwickelte und 2008 mit dem Adolf-Martens-Preis gewürdigte neue Prüf- und Zertifizierungskonzept hebt die Notwendigkeit der festen Kopplung des Motors an den Umrichter auf, ohne das Sicherheitsniveau abzusenken. Es wurde durch Betrachtung der einzelnen Frequenzumrichter Ausgangsparameter im Hinblick auf die zusätzlichen Verluste in der Maschine möglich, woraus eine Schnittstelle zwischen Motor und Umrichter definiert werden konnte. Für den sicheren Betrieb des Motors werden Grenzwerte der Schnittstellenparameter festgelegt. Parallel dazu ist es erforderlich, die Kühlung des Motors im Hinblick auf die aktuelle Drehzahl zu bewerten.

Die durch den Frequenzumrichter verursachten zusätzlichen Oberschwingungsverluste in der Maschine bewegen sich bei Einhaltung

Bild 4: Verlustaufteilung netz gespeister und frequenzumrichter gespeister Pumpenantriebe

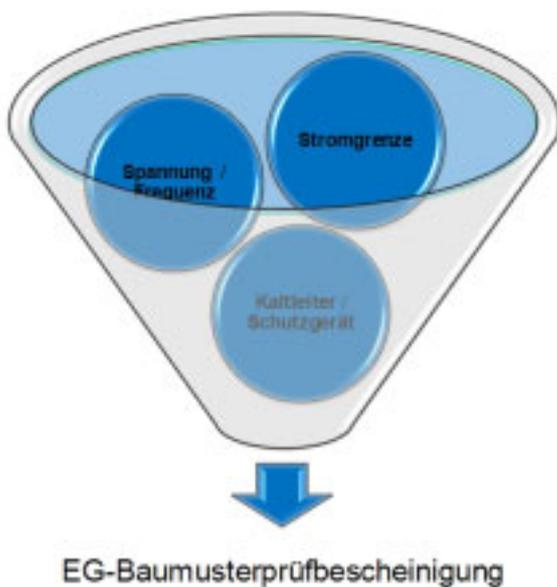


der zulässigen Schnittstellenparameter des Motors üblicherweise im Bereich bis zu fünf Prozent der Grundschwingungsverluste, so dass hier keine unzulässigen Erwärmungen zu erwarten sind.

Die Schnittstellenparameter beziehen sich jedoch nicht nur auf die Oberschwingungsbelastung, sondern auch auf den Grundschwingungswert. Eine Unterschreitung der Bemessungsspannung z. B. durch Spannungsabfälle an Umrichter und Leitungen kann zu einem unzulässig großen Maschinenschlupf und sehr hohen Temperaturen vor allem im Rotor der Maschine führen.

Diesen Gegebenheiten wird im neuen Prüf- und Zertifizierungskonzept durch eine drehzahlvariable Strombegrenzung Rechnung getragen, die als Funktion in den Umrichter implementiert werden muss, wobei der Umrichter selbst nicht zertifiziert wird. Daher muss als zusätzlicher Baustein des neuen Prüf- und Zertifizierungskonzeptes die direkte Temperaturüberwachung über Kaltleiter mittels eines funktionsgeprüften Überwachungsgerätes vorgesehen werden. Die EG-Baumusterprüfbescheinigung für den Motor enthält daher Angaben über die zulässige Oberschwingungs- und Impulsspannungsfestigkeit des Motors, die drehzahlvariable Strombegrenzung und den thermischen Maschinenschutz (Bild 5).

Bild 5: In der EG-Baumusterprüfbescheinigung festgelegte Parameter



Die bisherigen Erfahrungen mit dem neuen Prüf- und Zertifizierungskonzept sind überaus positiv. Es ist zu erwarten, dass damit der frequenzumrichter gespeiste Antrieb auch in explosionsgefährdeten Bereichen immer attraktiver wird und sehr große Energieeinsparungspotentiale erschließt. Bild 6 zeigt den Kostenverlauf für die netzgespeiste und umrichter gespeiste Variante eines Pumpenantriebes mit der Bemessungsleistung 18 kW.

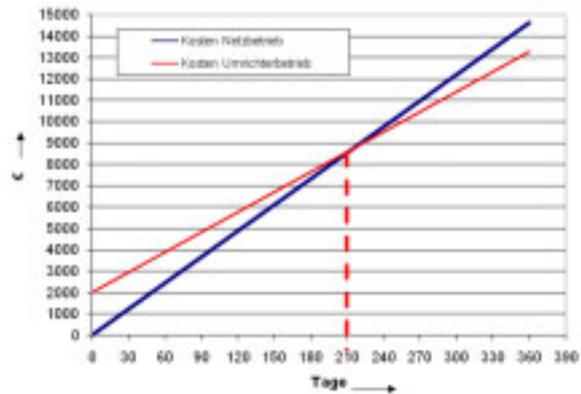


Bild 6: Energiekostenverläufe für den netzgespeisten und einen umrichter gespeisten Pumpenantrieb. Die Umrichterkosten von 2000 Euro haben sich hier nach 210 Tagen amortisiert.

Explosionsdruck in kleinen Volumina

Gehäuse von Geräten der Zündschutzart „Druckfeste Kapselung“ müssen sicher dem Explosionsdruck einer Explosion im Inneren des Gerätes standhalten. Der Explosionsdruck hängt u. a. von dem freien inneren Volumen des Gehäuses ab. Durch eine Prüfung muss diese Druckfestigkeit nachgewiesen werden. Dazu wird der maximale Explosionsdruck (der sogenannte Bezugsdruck) ermittelt, der bei Gehäusevolumen von kleiner als 2 cm³ experimentell nur sehr aufwendig zu bestimmen ist. Es wurde daher untersucht, ob zur Vereinfachung des Prüfverfahrens ein Grenzwert des maximalen Bezugsdrucks für kleine Volumina bestimmt werden kann.

Untersucht wurde die Volumenabhängigkeit des maximalen Explosionsdruckes für die in der EN 60079-1 genannten Prüfgasgemische von Propan, Ethen, Ethin und Wasserstoff. Der Volumenbereich betrug 0,1 cm³ bis 33 cm³. Der Volumeneinfluss auf den maximalen Explosionsdruck hängt dabei von der Verbrennungsgeschwindigkeit des Brennstoffs ab. So zeigt sich eine signifikante Erniedrigung bei Propan schon bei 10 cm³,

während bei Wasserstoff dieses erst bei sehr kleinen Volumina festgestellt werden kann (vgl. Bild 7). Die Ergebnisse führen zu keiner angemessenen Vereinfachung der Prüfung, da ein sich daraus ergebender konservativer Grenzwert zu unnötig hohen Anforderungen an die Stückprüfung der Geräte führen würde. Es ist daher auch in Zukunft sinnvoll, den Bezugsdruck in kleinen Volumina experimentell zu ermitteln.

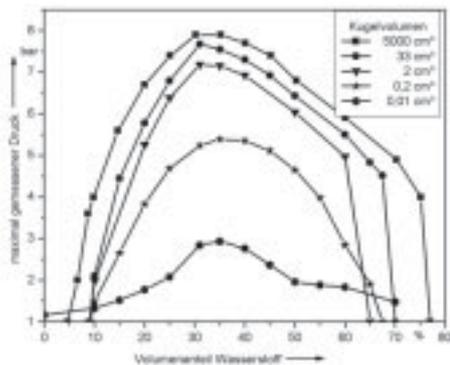


Bild 7: Maximaler gemessener Druck nach Zündung von Wasserstoff/Luft-Gemischen in unterschiedlicher Kugelvolumina. Bei einem Kugelvolumen von 0,1 cm³ ist eine Druckerhöhung aufgrund des elektrischen Zündfunken zu erkennen.

Flammensperren aus gesinterten Faserstrukturen

Dauerbrandsicherungen müssen im Falle einer Explosion einem stationären Brand auf ihrer Oberfläche standhalten. Für die Prüfung dieser Armaturen wird ein kritischer Volumenstrom eines charakteristischen Brennstoff/Luft-Gemisches durch die Flammensperre hindurchgeleitet und auf der Oberseite entzündet. Die sich auf der Flammensperre stabilisierende Flamme bringt Wärmeenergie in das System ein. Gelingt es der Dauerbrandsicherung nicht, diese Wärme durch Transportprozesse an die Umgebung abzuleiten, tritt die Flamme in die Flammensperre ein und wird nach einiger Zeit das Gasgemisch auf der geschützten Seite entzünden. Im Rahmen eines von der AiF im Rahmen des ProInno-II-Programms geförderten Forschungsprojekts wurde der Einsatz von Flammensperren aus hochtemperaturbeständigen gesinterten Faserstrukturen in Dauerbrandsicherungen untersucht.

Gesinterte Faserstrukturen weisen aufgrund ihres Herstellungsverfahrens eine wesentlich kleinere Wärmeleitung in axialer als in radialer Richtung auf. Aufgrund dieser Anisotropie wird die durch chemische Reaktionen freigesetzte Wärme bevorzugt nach außen an die Gehäusewandung transportiert, wo sie hauptsächlich durch Konvektion an die Umgebung abgegeben werden kann. Der Transport in axialer Richtung dagegen ist sehr viel kleiner, so dass die Temperatur an der Unterseite einer Flammensperre aus gesinterten Faserstrukturen nur geringfügig erhöht wird. Diese detaillierte Untersuchung der Wärmeübertragungsvorgänge ermöglicht es, die Vor- und Nachteile dieser neuartigen Flammensperren gegenüber klassischen Flammensperren aus aufgewickelten Siebblechen zu ermitteln. In Verbindung mit einem konstruktionsmethodischen Ansatz ist es so möglich, neuartige Produkte mit einer kalkulierbaren Erfolgsaussicht über bekannte Lösungen hinaus zu ermitteln.

Alternative Kraft- und Treibstoffe

Die Einführung von Ottokraftstoffen mit hohem Ethanolanteil („E85“) machte eine Neubewertung der sicherheitstechnischen Maßnahmen an Tankstellen erforderlich. Detaillierte Untersuchungen der sicherheitstechnischen Kenngrößen dieser Kraftstoffe auch mit sehr hohem Ethanolanteil waren Basis für eine Regelung der Bundesländer, der Veröffentlichung LV47 „Anforderungen an Anlagen für bioethanolhaltige Kraftstoffe“ des Länderausschuss für Arbeitsschutz und Sicherheitstechnik (LASI). Der geringere Dampfdruck, der höhere Flammpunkt bzw. obere Explosionspunkt sowie die kleinere Normspaltweite dieser Kraftstoffe führen für einige Aspekte des Explosionsschutzkonzeptes von Tankstellen zu höheren Anforderungen.

In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

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

Grundlagen der Metrologie

Bestimmung von Wachstumshormon im Serum

Zur Bestimmung von Wachstumshormon in klinischen Proben wurde ein neues Messverfahren entwickelt. Ziel ist es, Referenzwerte bei Ringversuchen für die externe Qualitätskontrolle zur Verfügung zu stellen. Das Verfahren basiert auf der Messung von enzymatischen Abbauprodukten mittels Isotopenverdünnungs-Massenspektrometrie (IDMS). Die Validierung wird anhand eines Ringversuchsmaterials des Referenzinstituts für Bioanalytik (RfB) der DGKL erfolgen. (A. Henrion, FB 3.1, andre.henrion@ptb.de)

Messung der Wasserdichte bei Temperaturen zwischen 30 °C und 90 °C

In der PTB durchgeführte Dichtemessungen an Reinstwasser im Temperaturbereich zwischen 30 °C und 90 °C bestätigen die von einer japanischen Gruppe gemessenen Abweichungen von den bisher verwendeten international vereinbarten Wasserdichtetabellen um mehr als 0,003 kg/m³. (H. Wolf, FB 3.3, henning.wolf@ptb.de)

Volumen und Dichte von Kugeln aus Isotopenangereichertem Silicium

Zwei Kugeln aus Isotopenangereichertem Silicium (²⁸Si) wurden in Australien für die Bestimmung der Avogadro-Konstante und für eine Neu-Definition des Kilogramm poliert. In der Arbeitsgruppe „Festkörperdichte“ der PTB wurden die ersten Messungen von Dichte, Volumen und Masse der beiden Kugeln durchgeführt. (H. Bettin, FB 3.3, horst.bettin@ptb.de)

Metrologie für die Gesellschaft

„Fingerabdrücke“ von Phosphordüngern

Mineralische Phosphordünger enthalten je nach Herkunft unterschiedliche Mengen toxischer und teilweise radioaktiver Elemente. Im Rahmen eines Projektes mit dem Julius-Kühn-Institut ist es gelungen, anhand genau gemessener Isotopenverhältnisse dieser Elemente die Herkunft von Phosphordüngern und Rohphosphaten zurückzuverfolgen. (D. Schiel, FB 3.1, detlef.schiel@ptb.de)

Messung von Dichte und thermischen Ausdehnungskoeffizienten von Gemischen aus fossilen Kraftstoffen und Biokraftstoffen

Der zunehmende Einsatz von Biokraftstoffen, die mit fossilen Kraftstoffen gemischt werden, erfordert die Messung der thermischen Ausdehnungskoeffizienten solcher Gemische, um eine Temperatur-Mengenumwertung von Kraftstoffvolumina zu ermöglichen. Die gesellschaftlich wie wirtschaftlich gleichermaßen relevanten Umwertungskoeffizienten für verschiedene Gemische wurden gemessen. Sie werden im Internet auf der Seite des Fachbereiches 1.5 (<http://www.ptb.de/de/org/1/15/index.htm>) zeitnah veröffentlicht. (H. Wolf, FB 3.3, henning.wolf@ptb.de)

Neuerscheinung: Safety Characteristic Data / Sicherheitstechnische Kenngrößen, Volume 1: Flammable Liquids and Gases / Brennbare Flüssigkeiten und Gase

Die zweite Auflage des zweibändigen Tabellenwerks „Sicherheitstechnische Kenngrößen“, das auf den empfohlenen Werten aus CHEMSAFE beruht, wurde komplett überarbeitet. Diese Auflage wurde zweisprachig auf Deutsch und Englisch verfasst und neu gegliedert. Der erste Band „Flammable Liquids and Gases/Brennbare Flüssigkeiten und Gase“ (von der PTB herausgegeben) ist erschienen und enthält auf ca. 650 Seiten die Daten von etwa 2100 brennbaren Reinstoffen. Der zweite Band „Explosion Regions of Gas Mixtures/Explosionsbereiche von Gasgemischen“ wird von der BAM herausgegeben. (W. Möller, FB 3.4, wolfgang.moeller@ptb.de)

Mischungsbruchbestimmung in nicht-reaktiven Freistrahlen

Die mathematische Modellierung des Mischungsprozesses instationärer gasförmiger Freistrahlen benötigt eine umfangreiche experimentelle Datenbasis. Dazu werden die Mischungsvorgänge an der Grenzschicht zwischen einem Helium-Freistrahls und umgebendem ruhenden Stickstoff schlierenoptisch und durch laserinduzierte Fluoreszenz quantitativ gemessen. Dem Stickstoff der Umgebung wird Stickstoffmonoxid hinzugefügt, welches durch einen Farbstofflaser selektiv angeregt werden kann. Aus der jeweiligen Intensität der laserinduzierten Fluoreszenz können unter Anwendung numerisch bestimmter Korrelationen Mischungsbruchprofile in den Freistrahlen bestimmt werden. Der verwendete Aufbau ermöglicht es, Mischungsbruchprofile bei einer Taktrate von 1 Hz mit hoher Reproduzierbarkeit zu bestimmen. (D. Markus, FB 3.5, detlef.markus@ptb.de)

Messtechnische Charakterisierung elektrostatische Entladungen

Elektrostatische Aufladung ist eine häufig vorkommende potenzielle Zündquelle in der chemischen und petrochemischen Industrie. Um aufwendige Zündversuche zu vermeiden, geschieht die messtechnische Bewertung der Zündwirksamkeit von elektrostatischen Entladungen anhand der während des Durchbruches der Gasstrecke übertragenen Impulsladung. Dazu wurden zwei unterschiedlichen Bestimmungsverfahren für die Impulsladung untersucht, wobei sich wichtige Erkenntnisse bezüglich der Eignung der beiden Verfahren, der einzuhaltenden Messbedingungen und der erreichbaren Messunsicherheit ergaben. (T. Langer, FB 3.7, tim.langer@ptb.de)

Entstehung von Zündquellen bei tribologischen Prozessen

Mechanisch erzeugte Zündquellen können Zündungen von explosionsfähigen Atmosphären in der Industrie verursachen. Bisher existiert jedoch kein allgemeingültiges Zündkriterium, um Schäden durch Maschinen im Fehlerfall zu verringern. Des Weiteren ist bisher der Einfluss der wirkenden tribologischen Mechanismen auf den Zündprozess nicht klar. Um die Funkenbildung in Abhängigkeit von Relativgeschwindigkeit und Flächenpressung zu ermitteln und deren Zündfähigkeit zu beurteilen, wurden Versuche mit einem unlegierten Stahl, einigen Edelstählen sowie Titan durchgeführt. Dabei wurden die Werkstoffe sowohl in homogener als auch in inhomogener Paarung untersucht. (F. Welzel, FB 3.7, felix.welzel@ptb.de)

PTB-Prüfregel für explosionsgeschützte elektrische Antriebssysteme

Die Neuausgabe der PTB-Prüfregel über explosionsgeschützte Antriebssysteme ist erschienen. Im Gegensatz zur ersten Ausgabe erstreckt sich die Neuausgabe auf alle anwendbaren Zündschutzarten für elektrische Maschinen. Die aktuelle Gesetzgebung durch die EU-Richtlinie 94/9/EG und die aktuellen Normen der Reihe EN 60079 werden näher erläutert. Ausführlich ist die Prüfung explosionsgeschützter Maschinen beschrieben. Abschließend wird die Entwicklung des Explosionsschutzes aus internationaler Sicht dargestellt. (F. Lienesch, FB 3.7, frank.lienesch@ptb.de)

Neues Explosionsschutzkonzept für frequenzumrichter gespeiste Antriebe der Zündschutzart „Erhöhte Sicherheit“

In der Chemie und Petrochemie besteht der Wunsch, frequenzumrichter gespeiste Antriebe möglichst flexibel und kostengünstig auch in explosionsgefährdeten Bereichen einsetzen zu können. Dabei ist die Einhaltung eines hohen Sicherheitsniveaus von grundlegender Bedeutung, denn bei Maschinen entstehen zusätzliche Zündgefahren, die bei der Auslegung der Maschine und deren sicherheitstechnischer Bewertung berücksichtigt werden müssen. Auf Grund des neuen Schutzkonzeptes ist nun eine unabhängige sicherheitstechnische Bewertung von Frequenzumrichter und Motor möglich. Spezielle Anforderungen an den Umrichter können nun in der EG-Baumusterprüfbescheinigung des Motors spezifiziert werden und erlauben den sicheren Betrieb des Motors an einer großen Zahl marktüblicher Umrichter. (C. Lehrmann, FB 3.7, christian.lehrmann@ptb.de)

Modellierung der Zündquelle heiße Oberfläche

Die tatsächlichen erforderlichen Zündtemperaturen in realen technischen Anordnungen unterscheiden sich zum Teil deutlich von der sicherheitstechnischen Kenngröße Zündtemperatur. Dies hängt u. a. von Strömungsgeschwindigkeiten, Behältern, Lage, Geometrie und wirksamer heißer Fläche ab. Experimentelle Untersuchungen und Simulationsrechnungen wurden durchgeführt, um ein allgemeingültiges Modell für die Zündung an heißen Oberflächen zu entwickeln. (T. Ott, FB 3.7, toni.ott@ptb.de)

Metrologie für die Wirtschaft

Leitfähigkeit als Qualitätsparameter bei der Autolackherstellung

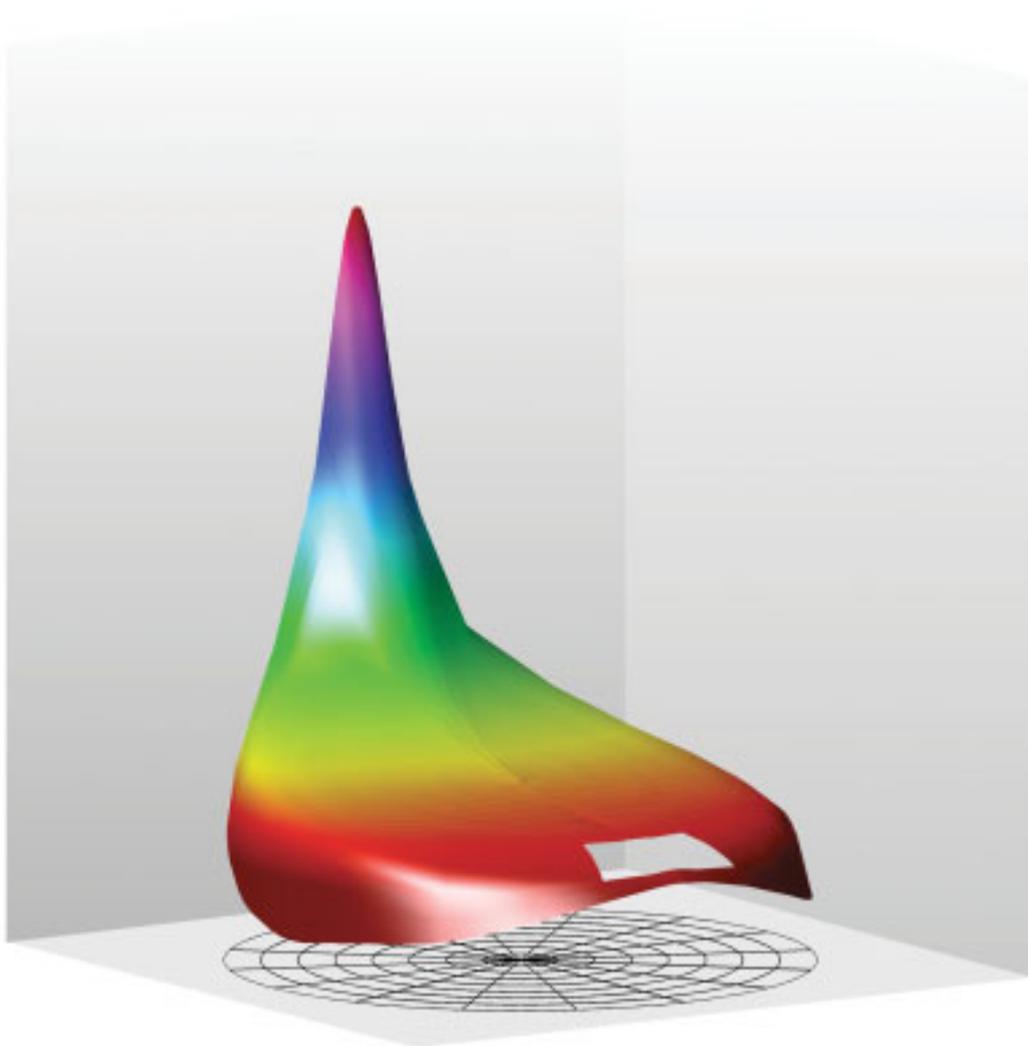
Durch die normgerechte Verwendung von auf die PTB zurückgeführten Kalibriernormalen für die Messung der Leitfähigkeit kann die Anzahl von Fehlmessungen in der Beschichtungstechnik, insbesondere für die Automobilindustrie, deutlich reduziert werden. (P. Spitzer, FB 3.1, petra.spitzer@ptb.de)

Messungen der extremen Spurenfeuchte erfolgreich abgeschlossen

Als eins von vier Staatsinstituten weltweit (USA, UK, Japan, Deutschland) hat die PTB erfolgreich innerhalb des Ringvergleichs EURAMET 1002 im Spurenfeuchtebereich bis hinunter zu einem Volumenanteil Wasserdampf von $1 \cdot 10^{-8}$ ihre metrologische Kompetenz bei der Generierung und Messung in diesem wissenschaftlich und industriell wichtigen Bereich der Gasfeuchte nachgewiesen. (N. Böse, FB 3.2, norbert.boese@ptb.de)



Optik



Berichte der Abteilungen

Abteilung

4

Optik

Die Optik prägt die unterschiedlichsten Anwendungsfelder in der Gesellschaft, liefert Schlüsseltechnologien für die Industrie und bietet selbst ein Feld für neueste Forschung und technologische Entwicklungen. Die Abteilung *Optik* der PTB berücksichtigt diese verschiedenen Anforderungen bei ihrer metrologischen Arbeit. Sie unterstützt Industrie, Wissenschaft und Gesellschaft durch Bereitstellung von Messmöglichkeiten sowie durch ihre Forschung und Entwicklung. Die Abteilung *Optik* bearbeitet hauptsächlich die Themenbereiche *Radiometrie und Photometrie, Länge und dimensionelle Messtechnik* und *Zeit und Frequenz*. In jedem dieser drei Bereiche ist sie für die Darstellung und Weitergabe der jeweiligen Basiseinheit Candela, Meter und Sekunde des Internationalen Einheitensystems zuständig. Aufbauend auf diesen Basiseinheiten von Lichtstärke, Länge und Zeit werden verschiedene Einheiten dargestellt und weitergegeben sowie höchstgenaue Normale und Messmethoden entwickelt. Dabei teilt sich die Abteilung *Optik* die Arbeit in der Radiometrie mit der Abteilung *Temperatur und Synchrotronstrahlung*, im Bereich Länge und dimensionelle Messtechnik mit der Abteilung *Fertigungsmesstechnik*. Die Abteilung *Optik* organisiert ihre Arbeit in den fünf Fachbereichen *Photometrie und angewandte Radiometrie, Bild- und Wellenoptik, Längeneinheit und Quantenoptik, Zeit und Frequenz* und *Optische Technologien*, wobei mehrere Fachbereiche in den einzelnen Themenbereichen zusammenarbeiten.

Titelbild:

Dreidimensional winkelaufgelöste Reflexionsverteilung (Strahldichtefaktor) eines Weißstandards aus gesintertem PTFE als Funktion des Reflektionswinkels in Falschfarbendarstellung bei einem Einstrahlungswinkel von $67,5^\circ$ und einer Wellenlänge von 550 nm. Die trapezförmige Fensterstruktur im vorderen Bereich kommt dadurch zustande, dass hier die bestrahlende Lichtquelle den Detektor verdeckt.

Im Folgenden werden einige wichtige Ergebnisse und besondere Entwicklungen des vergangenen Jahres aus diesen fünf Fachbereichen vorgestellt.

Photometrie und angewandte Radiometrie

Der Fachbereich *Photometrie und angewandte Radiometrie* realisiert neben der photometrischen Basiseinheit Candela unterschiedliche optische Einheiten und Messgrößen der verschiedenen untereinander eng verknüpften radiometrischen und photometrischen Einheiten im Wellenlängenbereich oberhalb von 200 nm und gibt sie mit angemessener kleiner Unsicherheit weiter. Schwerpunkte sind sowohl Forschung und Entwicklung als auch der Kalibrier- und Messservice im Bereich der Photometrie neuartiger Lichtquellen, die Spektroradiometrie von Strahlern im Spektralbereich 200 nm bis 2500 nm und die Metrologie von Solarzellen.

Eine besondere Herausforderung in der Photometrie und angewandten Radiometrie besteht darin, dass für die neuartigen Lichtquellen, die gegenwärtig entwickelt werden, auch weiterführende Messtechniken zu schaffen sind. Dabei unterscheiden sich diese Lichtquellen und damit die optimale Messtechnik je nach Anwendungsart (Raumbeleuchtung, Signalaufgaben, technologischem Einsatz, Automotivbereich) oder Typus (Energiesparleuchten, Leuchtdioden etc.). Um für die neuen Aufgaben gerüstet zu sein, hat die PTB in den letzten Jahren kontinuierlich ihre Messgeräteausrüstung mit neuartigen Konzepten weiter- und neu entwickelt (Bild 1).

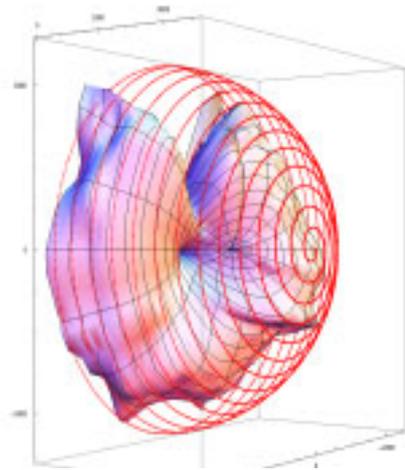


Bild 1: Visualisierung des Lichtstärkeverteilungskörpers einer wissenschaftlichen Glühlampe. Die Messung erfolgte mit dem Roboter-*goniophotometer* der PTB, bei dem der Justierroboter die Lichtquelle im Koordinatenursprung hält. Die rote Linie zeigt die Spur des Messkopfes am Ende des zweiten Roboterarms. Der Messkopf am dritten Roboterarm würde den nicht gezeigten Halbraum abtasten.

Allerdings wird es wegen der zunehmenden Komplexität der Anforderungen und der damit einhergehenden Vielfalt der Anwendungen (Bild 2) zunehmend dringlicher, die in der PTB erreichte Messgenauigkeit bestmöglich auch beim Anwender zum Einsatz zu bringen. Beispielsweise entstehen neue Herausforderungen in Industrie und Gesellschaft (Härtung von Kunststoffen oder Wasserentkeimung), die genau dosierte Bestrahlungsstärken im ultravioletten Spektralbereich erfordern. Mit den in der PTB entwickelten speziellen Deuteriumlampensystemen wurde jetzt ein internationaler Schlüsselvergleich zur Kalibrierung von Deuteriumlampen bezüglich ihrer spektralen Bestrahlungsstärke im Wellenlängenbereich von 200 nm bis 350 nm durchgeführt und im Jahr 2008 erfolgreich abgeschlossen. Im Ergebnis stimmen die Skalen der beteiligten Staatsinstitute im Rahmen der gemeinsamen Unsicherheit überein, so dass jetzt auch international geringere Unsicherheiten erreichbar sind (siehe Nachrichten aus der Abteilung).



Bild 2: Am europäischen Raumfahrtlabor Columbus, das in diesem Jahr zur internationalen Raumstation ISS gebracht wurde, befindet sich auch das Solar-Spektrometriemeter SOLSPEC, das in der PTB vor dem Start kalibriert wurde (siehe Nachrichten aus der Abteilung im Jahresbericht 2007).

Neben der Forderung nach zunehmender Genauigkeit in der optischen Metrologie führen Vereinfachungen der Messverfahren und Verringerung der Messzeiten zu kleineren Kosten und damit zu erhöhter Akzeptanz und wirtschaftlichen Vorteilen für die Anwender. Für viele radiometrische Anwendungen ist die Kenntnis und Optimierung der Homogenität der benutzten Bestrahlungsstärkefelder von großer Bedeutung. Diese Informationen erhält man bisher hauptsächlich durch ein zeitraubendes Abscannen der Fläche mit einem Photodetektor. In der PTB wurde gezeigt, wie stattdessen eine kommerziell erhältliche Kamera für die Messung der Homogenität eines Strahlungsfelds im Wellenlängenbereich von 300 nm bis 1100 nm eingesetzt werden kann. Diese kamerabasierte Methode ermöglicht eine Analyse der Feldhomogenität nahezu in Echtzeit. Auf diese Weise werden die Justierung optischer Messplätze wesentlich beschleunigt und die Qualitätskontrolle deutlich vereinfacht (siehe Nachrichten aus der Abteilung).

Bild- und Wellenoptik

Die Aufgabenschwerpunkte im Fachbereich *Bild- und Wellenoptik* umfassen einerseits sowohl die optische Formmessung mit Unsicherheiten in der Größenordnung von Nanometern und Sub-Nanometern an optischen Oberflächen mit geringer Rauigkeit als auch die quantitative Mikroskopie und höchstauflösende Mikroskopie an Oberflächenstrukturen im Mikrometer- und Sub-Mikrometerbereich. Im Fachbereich werden hierzu Grundlagenuntersuchungen durchgeführt, Messverfahren entwickelt und Forschungsprojekte in Zusammenarbeit mit der Industrie durchgeführt. Darüber hinaus werden spezifische Messaufgaben zur optischen Übertragungsfunktion, zur Transmission von strahlformändernden optischen Komponenten und zur Polarimetrie und Refraktometrie durchgeführt.

Eine dauerhafte Herausforderung an die optische Messtechnik stellt die relativ große Wellenlänge der optischen Strahlung dar, die zur Charakterisierung der immer kleiner werdenden Mikro- und Nanostrukturen benutzt wird. Im Fachbereich werden daher optische Methoden mit möglichst kurzer Wellenlänge (siehe Nachrichten aus der Abteilung) mit der Elektronenmikroskopie und der Rasterkraftmikroskopie ergänzt. Ein Schwerpunkt der letzten Jahre bestand in der Untersuchung nichtabbildender Verfahren zur Umgehung der beugungsbegrenzten Auflösung. In der PTB war dazu ein Deep-UV-Scatterometer (siehe Jahresbericht 2006) entwickelt worden, dessen metrologische Validierung aufschlussreiche Ergebnisse lieferte: Die Verwendung einer oder weniger Wellenlängen in einem Scatterometer ist den breitbandig arbeitenden Messverfahren aus metrologischer Sicht überlegen, da der Einfluss des Brechungsindex' dort einen wesentlichen Beitrag zur Messunsicherheit liefert. Es konnte gezeigt werden, dass auch Absorptionsstrukturen auf Fotomasken, die für das extreme Ultraviolett ausgelegt sind, mit einem im tiefen UV arbeitenden Scatterometer charakterisiert werden können. Untersuchungen für Strukturen auf transparentem Substrat zeigten überdies, dass bei den in der Industrie eingesetzten Messgeräten Rückreflexe im Allgemeinen nicht ausreichend berücksichtigt werden.

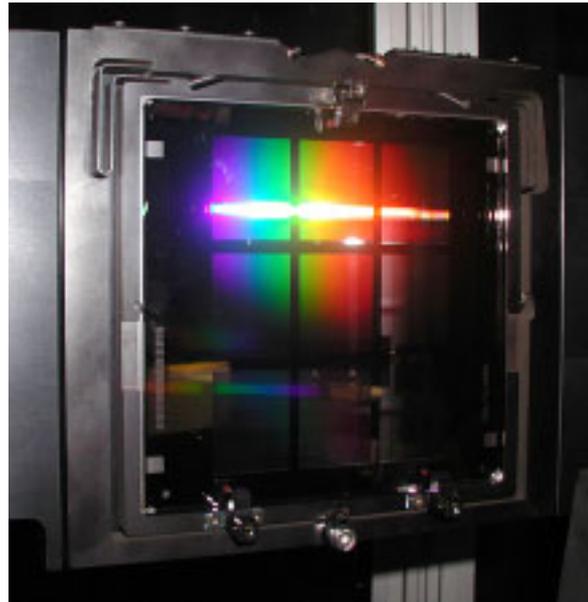


Bild 3: Photomaske im neuen UV-Scatterometer der PTB

Interferometer werden in großem Umfang zur höchstpräzisen Vermessung der Oberflächenform oder der optischen Dicke (Bild 4) von großen optischen Komponenten eingesetzt. Soll aus den Interferogrammen allerdings die absolute Form bestimmt werden, so hängt die erreichbare Genauigkeit stets von einer genau bekannten Referenzoberfläche im Interferometer ab, die die gleichen Ausdehnung wie das Interferometer haben muss. In der PTB wurde nun ein interferometrisches Verfahren entwickelt, das ohne die Vorkenntnis der Referenzfläche auskommt, wenn das ebenfalls in der PTB entwickelte so genannte Traceable-Multi-Sensor-Verfahren mit der interferometrischen Messung kombiniert wird. Die abgeschätzten Unsicherheiten betragen wenige Nanometer.

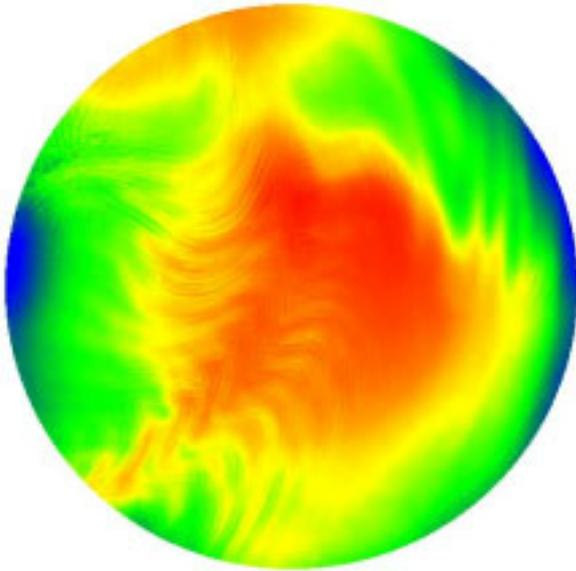


Bild 4: Änderung des Brechungsindex' einer Zerodurplatte, sichtbar gemacht in einem Interferometer. Die Änderung des Brechungsindex' in dem Farbbereich von Blau nach Rot entspricht $1 \cdot 10^{-5}$.

Zeit und Frequenz

Mit dem Zeitgesetz von 1978 und in der im vergangenen Jahr geänderten Form des Gesetzes über die Einheiten im Messwesen und die Zeitbestimmung (Einheiten- und Zeitgesetz – EinhZeitG) ist der PTB in Deutschland die Verantwortung für die Darstellung und Weitergabe der gesetzlichen Zeit übertragen. Der Fachbereich *Zeit und Frequenz* entwickelt und betreibt dafür die genauesten Atomuhren, stellt die gesetzliche Zeit in Deutschland dar, verbreitet sie in Deutschland und Europa und trägt in herausgehobener Weise zur Erzeugung der internationalen Weltzeit bei. Die Arbeit des Fachbereichs wird ergänzt durch Forschung im Bereich der Präzisions-Zeitübertragungstechniken, unterstützt im Rahmen mehrerer europäischer Projekte.

Der Sekunde als Basiseinheit im Internationalen Einheitensystem kommt eine besondere Bedeutung zu, da Zeit- und Frequenzmessungen die genauesten Messungen überhaupt erlauben. Die Forschung und Entwicklung unter prominenter Mitwirkung der PTB hat dazu geführt, dass genaue Zeitinformation über unterschiedliche Verteilungswege in ganz Deutschland kostenlos zur Verfügung steht. Diese Dienstleistung der PTB wird von großen Teilen der Bevölkerung

genutzt und ist von hoher Bedeutung für die Volkswirtschaft. Gleichzeitig wurde die Genauigkeit der primären Caesiumatomuhren in den letzten Jahrzehnten pro Jahrzehnt um etwa eine Größenordnung gesteigert. Diese Genauigkeit wird für eine Verbesserung der Weltzeitskala benötigt und für die neuen Satellitennavigationssysteme vorteilhaft genutzt. Auch zukünftig gibt es vor allem für wissenschaftliche Grundlagenuntersuchungen oder in der Weltraumfahrt starken Bedarf an verbesserten primären Uhren, dem die PTB mit Neuentwicklungen nachkommt.

Nach der Inbetriebnahme der zweiten Caesiumatomfontänenuhr der PTB (Bild 5) wurde damit begonnen ihr Unsicherheitsbudget zu evaluieren. Dabei konnte gezeigt werden, dass die Frequenzen der beiden Atomfontänen im Rahmen ihrer gegenwärtigen Unsicherheiten übereinstimmen (siehe Nachrichten aus der Abteilung). Mit zwei verfügbaren Fontänenuhren hat die PTB jetzt die Möglichkeit, die Uhren gleichzeitig weiterzuentwickeln, ohne auf deren Nutzung als primäre Normale verzichten zu müssen.



Bild 5: In der neuen Fontänenuhr der PTB werden die Caesiumatome im Kreuzungspunkt von sechs Laserstrahlen gekühlt, bevor sie zur Anregung und Abfrage nach oben beschleunigt werden.

Durch die Weiterentwicklung der seit dem Jahr 2000 in Betrieb befindlichen Caesiumfontänenuhr CSF1 konnte die Kurzzeitstabilität soweit verbessert werden, dass jetzt bei Messzeiten von einem Tag statistische Unsicherheiten von weniger als $5 \cdot 10^{-16}$ erreicht werden können. Der Nachweis einer solchen statistischen Unsicherheit war mög-

lich, weil die PTB mit dem optischen Ytterbium-Frequenznormal ein bezüglich der Frequenzstabilität den Caesium-Fontänen-uhren überlegenes Normal zur Verfügung hat (siehe Nachrichten aus der Abteilung).

Die PTB entwickelt und untersucht optische Frequenznormale, die neben ihrer überlegenen Frequenzstabilität auch kleinere Unsicherheiten versprechen, als mit Caesium-atomuhren zu erwarten sind. Um für die damit absehbare erforderliche Neudefinition der Zeiteinheit gerüstet zu sein, werden in der PTB zwei unterschiedliche Arten von optischen Uhren untersucht, um den geeignetsten Kandidaten zu finden. Im einen Fall wird der Übergang in einem einzelnen Ion, das in einer Ionenfalle gefangen ist (Bild 6), angeregt. Im anderen Fall nutzt man für die Anregung sehr viele neutrale Atome, die in einem Gitter aus Licht festgehalten werden (Optische Gitteruhr).



Bild 6: Die neue Ionenfalle der PTB. Bei dieser so genannten Endkappenfalle wird das Ion im freien Spalt zwischen den im oberen Bildteil sichtbaren konzentrisch aufgebauten Elektroden gehalten.

Neben der Entwicklung verbesserter primärer Uhren misst die PTB der Entwicklung neuer Methoden der genauen und einfachen Weitergabe von Zeit und Frequenz zu den unterschiedlichsten Anwendern höchste Bedeu-

tung bei. Gegenwärtig werden auch hier unterschiedliche Wege verfolgt. So hat die PTB eine mobile Frequenzreferenz entwickelt, die einen transportablen passiven Wasserstoffmaser an einen Empfänger für die Signale des Global Positioning Systems (GPS) koppelt (siehe Nachrichten aus der Abteilung). Bei Mittelungszeiten von etwa einem Tag lässt sich damit in praktisch jedem Labor eine relative Messunsicherheit der Frequenz von wenigen 10^{-15} erreichen.

Wie GPS ist auch das zukünftige europäische Satellitennavigationssystem Galileo für internationale Zeitvergleiche und die Übertragung der koordinierten Weltzeit (UTC) geeignet. Die PTB arbeitet dabei an der Entwicklung der so genannten „Precise Timing Facilities“ mit, in denen die Systemzeit von Galileo erzeugt wird (Bild 7). Auch weiterhin hat die PTB eine wesentliche Rolle bei der Erzeugung der Systemzeit von Galileo, für die sie langfristig die Daten ihrer primären Uhren bereitstellt (siehe Nachrichten aus der Abteilung).



Bild 7: Subsysteme der „Precise Timing Facility“ des Satellitennavigationssystems Galileo wurden in der PTB aufgebaut und validiert.

Quantenoptik und Längeneinheit

Der Fachbereich ist für die Realisierung und Weitergabe der Längeneinheit Meter verantwortlich und befasst sich mit der Anwendung quanten- und röntgenoptischer Methoden für Präzisionsmessungen. Dazu werden höchstgenaue Normale für optische Wellenlängen und Frequenzen sowie neue Methoden zu deren Weitergabe entwickelt. In diesem Arbeitsgebiet unterstützt der Fachbereich *Quantenoptik und Längeneinheit* den Fachbereich *Zeit und Frequenz* der PTB.

Für die optische Gitteruhr der PTB werden etwa eine Million neutrale Strontiumatome bei einer Temperatur von 4 millionstel Kelvin in einem Lichtgitter gespeichert. Bei vergleichbaren übrigen Parametern kann damit im Idealfall eine tausendfach höhere Frequenzstabilität erreicht werden als bei einer optischen Einzelionenuhr. Allerdings ist der Aufbau etwas komplexer als bei der Einzelionenuhr. Im vergangenen Jahr wurde schwerpunktmäßig ein weiterer Ansatz verfolgt: Es wurde untersucht, inwieweit neben dem Isotop Strontium-87, das üblicherweise für die Strontium-Gitteruhr genutzt wird, mit dem Isotop Strontium-88 eine einfachere Version der optischen Gitteruhr, gegebenenfalls mit etwas reduzierter Genauigkeit, entwickelt werden kann. Der durch die Quantenmechanik eigentlich verbotene Uhrenübergang wurde mit Hilfe eines zusätzlichen Magnetfeldes angeregt und daran der Einfluss der Stöße der Atome untereinander spektroskopisch untersucht (siehe Nachrichten aus der Abteilung). Abschätzungen auf der Basis der durchgeführten Untersuchungen ergaben, dass eine relative Unsicherheit von 10^{-16} möglich ist.

Für die erwartete Frequenzstabilität zukünftiger optischer Uhren sind die etablierten Verfahren der Zeit und Frequenzübertragung mit Satelliten nicht mehr ausreichend, da schon bei 10^{-16} für die Frequenzstabilität der Verbindung eine Mittelung über viele Tage erforderlich ist. Daher wird untersucht, mit welcher Unsicherheit die Verteilung höchstgenauer optischer Frequenzen über das Telekommunikationsfasernetz möglich ist. In Zusammenarbeit mit Netzbetreibern wurde eine Glasfaserstrecke von ca. 150 km Länge aufgebaut und charakterisiert, die unterirdisch von der PTB zu einem Labor der Leibniz-Universität Hannover und zurück verläuft (siehe Nachrichten aus der Abteilung). Es zeigte sich, dass schon bei einer Mittelungszeit von wenigen hundert Sekunden die Frequenzfluktuationen durch die Faserübertragung unter 10^{-17} gehalten werden können. Damit ist sichergestellt, dass mit diesem Verfahren auch die zukünftig genauesten optische Uhren ohne Verlust an Genauigkeit miteinander verglichen werden können. Das Verfahren bietet überdies zukünftig die Möglichkeit, interessierten Nutzern in Forschung und Technologie die genauesten

Frequenzen zur Verfügung zu stellen, wenn ein solcher Service eingerichtet werden würde.

Die beiden Fachbereiche *Quantenoptik und Längeneinheit* und *Zeit und Frequenz* sind besonders eingebunden in das Exzellenzcluster Centre for Quantum Engineering and Space-Time Research (QUEST) an der Universität Hannover. (siehe Nachrichten des Jahres der Fachabteilungen). Gemeinsam werden dort die Fragen zur Konstanz der Fundamentalkonstanten und zur Entwicklung von Sub-Hertz-Lasern als höchststabile optische Oszillatoren in den Atomuhren der nächsten Generation bearbeitet.

Der Fachbereich ist federführend bei einem Konsortium von metrologischen Staatseinrichtungen in einem internationalen Projekt zur Neubestimmung der Avogadrokonstanten auf der Basis von hochangereichertem Silicium-28. Innerhalb dieses Projekts hat der Fachbereich das Teilprojekt „Präzisionsbestimmung des ^{28}Si -Gitterparameters“ übernommen.

Optische Technologien

Der Fachbereich *Optische Technologien* ist eingerichtet worden, um die Messmöglichkeiten der PTB im Gebiet der Mikro- und Nanooptik und der integrierten Optik zu erweitern, die als Schlüsselkomponenten der Photonik zukünftig immer stärkere Bedeutung haben werden. Er führt Forschungs- und Entwicklungsaufgaben zur Reflexion und Transmission unterschiedlicher Materialien und zur Laserradiometrie durch und bietet einen intensiven Kalibrier- und Messservice an. Weitere Schwerpunkte liegen im Bereich der optisch nichtlinearen Mikroskopie, der chemischen und medizinischen Bildgebung, der Charakterisierung photonischer Komponenten, der mikrooptischen Messtechnik und der Einzelphotonenquellen.

Besondere messtechnische Herausforderungen entstehen gegenwärtig im Gebiet der so genannten optischen „Appearance“, die eine quantitative Beschreibung der unterschiedlichen visuellen Erscheinungsbilder von optischen Oberflächen unter beliebigen Beleuchtungsbedingungen zum Ziel hat. Die Entwicklung neuartiger Effekt-Lacke, die bei einer Änderung des Betrachtungswinkels ihre Farbe ändern, die jetzt industriell mögliche

Herstellung mikro- und nanostrukturierter Oberflächen oder auch die Forderung nach einem möglichst gleichen optischen Eindruck von Produkten auch bei unterschiedlichen Fertigungsbedingungen stellen Beispiele solcher neuartiger Anforderungen dar.

Mit dem in der PTB entwickelten roboter-gestützten Gonioreflektometer können dreidimensionale Reflexionsverteilungen bei beliebigen Einstrahlungsrichtungen vollautomatisch, schnell und mit hoher Reproduzierbarkeit gemessen werden. Mit diesem Messplatz wurden unterschiedliche diffuse Reflexionsstandardmaterialien charakterisiert, die verwendet werden können, um kommerzielle Messgeräte wie Colorimeter, Spektralphotometer oder Leuchtdichtekameras auf die absolute Skala zurückzuführen (siehe Nachrichten aus der Abteilung). Die durchgeführten Messungen bilden den Grundstock für eine Datenbank, die über das Internet Nutzern aus Forschung und Industrie zugänglich gemacht werden soll, um die subjektive optische Wahrnehmung optischer Oberflächen auch quantitativ erfassen zu können.

Auch in der fünften Dekade nach ihrer Erfindung sind Laser in der Industrie, Medizin und im Konsumentenbereich Schlüsselkomponenten. So stoßen beispielsweise bei der technischen Materialbearbeitung wie Schweißen, Löten oder Härten die unterschiedlichsten Laser wie Diodenlaser, Faserlaser oder andere Festkörperlaser schnell in neue Leistungsbereiche vor. Dies stellt die Laserradiometrie vor stetig neue Anforderungen, die wegen des weiten Wellenlängen- und Leistungsbereichs eine Konzentration auf die Bereiche der industriellen Notwendigkeit erfordert. In der PTB wurden jetzt in einem Forschungsvorhaben mit einem Industriepartner neue Messmethoden für die Messung der Strahlungsleistung von Diodenlasern bis 250 Watt entwickelt. Im Ergebnis können nun Laserleistungsempfänger bei den Wellenlängen von 915 nm, 940 nm und 980 nm und 808 nm kalibriert werden, was den industrie-relevanten Bereich für Diodenlaser abdeckt (siehe Nachrichten aus der Abteilung).

Aus den Fortschritten der Quantenoptik, die zur Quantenkommunikation und -kryptographie führten, erwachsen neuartige Aufgabenstellungen auch in der Radiometrie, die im

Rahmen des iMERA Plus-Programms der Europäischen Forschungsförderung gemeinsam mit anderen nationalen Metrologieinstituten bearbeitet werden. Im Projekt „Candela: Towards quantum-based photon standards“ werden im Fachbereich *Optische Technologien* der PTB Einzelphotonenquellen (Bild 8) weiterentwickelt und hinsichtlich ihrer spektralen und dynamischen Eigenschaften charakterisiert (siehe Nachrichten aus der Abteilung). Diese Untersuchungen führen zu einer Radiometrie im Bereich von Strahlungsflüssen, die von wenigen Photonen getragen werden. Das Ziel ist es, in diesem Bereich quantenbasierte radiometrische Standards zu schaffen, um dann den Bereich bis zur „klassischen“ Pikowatt-Radiometrie zu überbrücken.

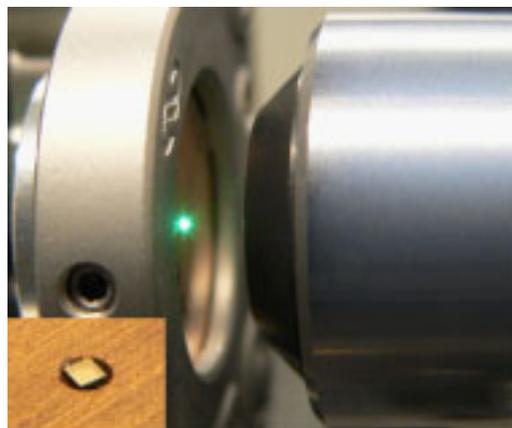


Bild 8: Das Herzstück einer Einzelphotonenquelle, ein mit Stickstofffehlstellen dotierter Diamant (siehe Einsatzbild) im Anregungslicht eines Argon-Ionen-Lasers.

In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

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

Grundlagen der Metrologie

Verglichen und bestätigt: PTB weltweit führend in der Messung von UV-Strahlung

Internationale Messvergleiche bringen es an den Tag, ob Messungen verschiedener nationaler metrologischer Institute weltweit gleichwertig sind. So auch bei der Messung der spektralen Bestrahlungsstärke von UV-Strahlern. Ein von der PTB organisierter Schlüsselvergleich im UV-Spektralbereich von 200 nm bis 350 nm ergab – im Rahmen der erreichten Messunsicherheiten – die Äquivalenz der Kalibrierungen fünf führender Staatsinstitute. Insbesondere weisen die Ergebnisse des amerikanischen Staatsinstitutes NIST und der PTB eine sehr gute Übereinstimmung auf. (P. Sperfeld, FB 4.1, peter.sperfeld@ptb.de)

Direkte Kalibrierung flächenmessender Interferometer

Das in der PTB entwickelte TMS (Traceable Multi Sensor)-Verfahren kann auch zur direkten Ermittlung systematischer Interferometerabweichungen und damit zur direkten Kalibrierung von flächenmessenden Interferometern eingesetzt werden. Es wurde nachgewiesen, dass sich dabei besonders bei großen Interferometern Vorteile ergeben. (M. Schulz, A. Wiegmann, FB 4.2, michael.schulz@ptb.de)

Auf dem Weg zum Calcium-Bose-Einstein-Kondensat – Einfang von ultrakalten Calciumatomen in optischen Dipolfallen

Für Präzisionsmessungen mit Calcium-Atomen wird versucht, ein Bose-Einstein-Kondensat als kohärente Quelle von Atomen herzustellen. Auf dem Weg dazu wurden etwa eine halbe Million Atome im Kreuzungsbereich zweier optischer Dipolfallen gefangen. Es wurde eine Phasenraumdichte von 0,06 bei einer Temperatur von 12 μK erreicht; zur Kondensation ist nur noch eine Verringerung der Temperatur um weniger als eine Größenordnung erforderlich, was durch Verdampfung der jeweils energiereichsten schnellsten Atome erreicht werden soll. (U. Sterr, FB 4.3, uwe.sterr@ptb.de)

Silizium-28-Projekt mit ersten Ergebnissen

Der Avogadrokristall mit hochangereichertem ^{28}Si wurde auf seine Materialeigenschaften untersucht. Seit April 2008 wird in der PTB, im japanischen Metrologieinstitut NMIJ und am BIPM die Dichte von zwei 1 kg- ^{28}Si -Kugeln sowohl absolut mit Kugelinterferometern und Massekomparatoren als auch relativ mit Hilfe der Flotationsmethode und der hydrostatischen Wägung bestimmt, mit dem Ziel, eine relative Messunsicherheit von $1 \cdot 10^{-8}$ zu erreichen. Die Ergebnisse bestätigen die hohe chemische und isotopische Reinheit des Materials. (P. Becker, FB 4.3, peter.becker@ptb.de)

Optische Glasfaser von 147 km Länge überträgt hochgenaue optische Frequenzen zwischen Universität Hannover und PTB: erster Faserlink im deutschen Verbund charakterisiert

Ein neues Konzept der PTB zur Übertragung höchststabiler Frequenzen per Glasfaser ist weiterentwickelt und erstmals an einer längeren verlegten Faserstrecke in Deutschland erprobt worden. In Zusammenarbeit mit dem Deutschen Forschungs-Netz (DFN), den Firmen Gasline und EN-BS sowie dem Rechenzentrum der PTB wurde eine Glasfaserstrecke von 147 km Länge geschaltet, die unterirdisch von der PTB zu einem Labor der Universität Hannover und zurück verläuft. Durch ein verbessertes Kompensationssystem werden auftretende Frequenzfluktuationen deutlich reduziert: Bereits nach einer Stunde wurde für die übertragene Frequenz eine relative Unsicherheit von $1 \cdot 10^{-18}$ erreicht. (G. Grosche, FB 4.3, gesine.grosche@ptb.de)

Beobachtung von Dekohärenzeffekten in einer Strontium-Gitteruhr

Auf dem Weg zu einer optischen Gitteruhr mit neutralen Strontium-Atomen wurde in der PTB erstmals der Uhrenübergang $1S_0 - 3P_0$ mit ^{88}Sr beobachtet. Bei der Anregung der Atome wurde eine deutliche Verkürzung der Fallenlebensdauer beobachtet, die auf inelastische Stöße zwischen den Sr-Atomen zurückgeführt werden konnte. Darüber hinaus wurde die Stoßverbreiterung und -verschiebung des Übergangs beobachtet. Die Stoßprozesse wurden modelliert, so dass Aussagen über die notwendigen Betriebsparameter einer Sr-Gitteruhr mit ^{88}Sr möglich werden. (Ch. Lisdat, FB 4.3, christian.lisdat@ptb.de)

Realisierung eines optischen Synthesizers

Mittels eines optischen Frequenzkammgenerators wurde die Frequenzstabilität eines für eine optische Calciumuhr entwickelten Diodenlasers auf einen zweiten Laser anderer Wellenlänge übertragen. Der Calcium-Uhrenlaser mit einer Frequenz von 456 THz und einer Linienbreite von 1 Hz ist auf einen Referenzresonator stabilisiert, der unter hohem technischen Aufwand von allen äußeren Störeinflüssen isoliert ist. Seine Stabilität wird nun auf einen zweiten weniger aufwendig stabilisierten Diodenlaser übertragen, der bei einer Frequenz von 429 THz arbeitet und zur Entwicklung einer optischen Gitteruhr mit Strontiumatomen dient. (T. Legero, FB 4.3, thomas.legero@ptb.de)

Verbesserung der Instabilität und Betriebssicherheit der Caesium-Fontäne CSF1

Instabilität und Betriebssicherheit der Caesium-Fontäne CSF1 wurden weiter verbessert. Erstmals wurden bei Frequenzmessungen mit CSF1 Instabilitäten unterhalb von 10^{-15} erzielt. Bei zwei Langzeitmessungen über jeweils 25 Tage wurden effektive Messzeiten von 99,9 % erreicht. (S. Weyers, FB 4.4, stefan.weyers@ptb.de)

Erste Vergleichsmessungen zwischen den Caesium-Fontänen CSF1 und CSF2

Die zweite Caesium-Fontäne CSF2 der PTB befindet sich zur Zeit in der Phase der Evaluierung des Unsicherheitsbudgets. Erste Ergebnisse liegen bereits vor, so dass die Möglichkeit genutzt wurde, CSF2 mit CSF1 zu vergleichen. Zwischen beiden Fontänen wurde eine relative Frequenzdifferenz von $(0,94 \pm 1,33) \cdot 10^{-15}$ gemessen, was eine gute Übereinstimmung im Rahmen der Messunsicherheit darstellt. (S. Weyers, FB 4.4, stefan.weyers@ptb.de)

Neue Ionenfalle für optische Frequenznormale

Für die Anwendung im optischen Frequenznormal mit einem gespeicherten Yb^+ -Ion wurde eine neue Ionenfalle – eine so genannte Endkappenfalle – entworfen und aufgebaut. Bei der Konstruktion wurde auf hohe mechanische Stabilität und eine gute Kontrolle elektrischer und magnetischer Felder geachtet, da dies für die Reduzierung der systematischen Unsicherheit des Frequenznormals von Bedeutung ist. (E. Peik, FB 4.4, ekkehard.peik@ptb.de)

Langzeitbetrieb eines optischen Ionenfrequenznormals

Bei Messungen der absoluten Frequenz eines auf $^{171}\text{Yb}^+$ basierenden optischen Einzelionen-Frequenznormals wurden Messintervalle bis zu 120 Stunden und eine relative statistische Unsicherheit von $\text{sy}(65000 \text{ s}) = 4 \cdot 10^{-16}$ erreicht. (Chr. Tamm, FB 4.4, christian.tamm@ptb.de)

Langfristige Perspektiven für die Unterstützung des Satellitennavigationssystems Galileo durch die PTB

Der Galileo Time Service Provider (GTSP) stellt die Verbindung zwischen dem Galileo-Bodensegment und europäischen Zeitinstituten, darunter die PTB, her. Die PTB liefert seit 2008 Uhrendaten und organisierte eine Kalibrierkampagne zwischen den Zeitvergleichseinrichtungen der beteiligten Institute. Derartige Aktivitäten werden sowohl während der sogenannten „In-Orbit-Validation“ wie auch während des eigentlichen Betriebs von Galileo nach 2013 benötigt. (A. Bauch, FB 4.4, andreas.bauch@ptb.de)

Spektrale Transmission eines quadratisch strukturierten zweidimensionalen photonischen Kristalls im Infraroten

Der spektrale Transmissionsgrad eines zweidimensionalen photonischen Kristalls wurde im Wellenlängenbereich von 1,1 μm bis 2,5 μm bestimmt. Die Analyse der auftretenden Resonanzphänomene zeigt, dass mit der Methode der Laserlithographie auch großflächige photonische Komponenten präzise gefertigt werden können. (A. Schirmacher, FB 4.5, alfred.schirmacher@ptb.de)

Messung der dreidimensionalen Reflexionsindikatrix von Standard-Reflexionsmaterialien

Es wurden für verschiedene Einfallswinkel erste Messungen der dreidimensionalen Reflexionsverteilung (Reflexionsindikatrix) von Standardmaterialien durchgeführt. Die bisher untersuchten Materialien sind gesinteres PTFE (Polytetrafluorethylen), Opalgläser, Keramiken und Bariumsulfat. Solche spektral- und winkelaufgelösten Reflexionsdaten sind eine wichtige Referenz für Hersteller von radio- und photometrischen Produkten. Die Messungen bilden den Grundstock für eine Datenbank, die über das Internet Nutzern aus Forschung und Industrie zugänglich gemacht werden soll. (A. Höpe, K.-O. Hauer, FB 4.5, andreas.hoepe@ptb.de)

Bilateraler Vergleich der Skalen des spektralen Strahldichtefaktors mit dem finnischen metrologischen Staatsinstitut

Mit dem finnischen Staatsinstitut wurde ein bilateraler Vergleich der verschiedenen Skalen des spektralen Strahldichtefaktors durchgeführt. Hierzu wurden verschiedene Reflexionsstandards im Spektralbereich von 250 nm bis 1700 nm kalibriert. Neben den genormten Geometrien wurden auch Messungen der winkelabhängigen Reflexionsverteilung (Reflexionsindikatrix) durchgeführt. Die Ergebnisse des Vergleichs zeigen Übereinstimmung im Rahmen der kombinierten Messunsicherheit beider Teilnehmer. (A. Höpe, FB 4.5, andreas.hoepe@ptb.de)

Emittieren Hochleistungs-Femtosekunden-Faserlaser phasenkohärente Impulse?

Mit Hilfe eines Interferometers auf Glasfaserbasis wurden die optischen Trägerphasendifferenzen von jeweils zwei aufeinander folgenden Impulsen eines kommerziellen Hochleistungs-Femtosekundenlasers gemessen. Sie waren immer viel kleiner als 1 Radian und somit eindeutig verfolgbar. Damit wurde gezeigt, dass diese Laser in der phasenkohärenten Frequenzmetrologie einsetzbar sind, wobei ihre große Impulsenergie völlig neue Möglichkeiten eröffnet. (E. Benkler, FB 4.5, erik.benkler@ptb.de)

Detektion optischer Nichtlinearitäten in photonischen Komponenten unabhängig von den Laserparametern

Mittels heterodyndetektierter Vierwellenmischung wurde die so genannte „schnelle“ optische Nichtlinearität von modernen Hohlkernfasern untersucht. Die Empfindlichkeit war dabei so groß, dass bereits Faserlängen von 20 mm für genaue Messungen ausreichten. Bei dem neuartigen Messkonzept diente der bekannte nichtlineare Brechungsindex von Quarzglas als Referenz. (A. Sherman, FB 4.5, anatoly.sherman@ptb.de)

Europäisches Projekt „Candela: Towards quantum-based photon standards“

Im Rahmen der iMERA Plus-Forschungsinitiative beteiligen sich verschiedene Fachbereiche der PTB zusammen mit Partnern aus 6 europäischen Staatsinstituten am Projekt „Candela: Towards quantum-based photon standards“. In der Arbeitsgruppe *Laser-radiometrie* sollen Einzelphotonenquellen auf der Basis lokalisierter Zentren im Diamant und Halbleiterquantenpunkten entwickelt, weiterentwickelt und charakterisiert werden. Aufgabe der Arbeitsgruppe *Laserradiometrie* ist dabei eine Verbesserung der Einzelphotoneneigenschaften. Ziel ist es, letztlich eine Grundlage für die absolute Radiometrie im Leistungsbereich weniger Photonen zu schaffen. (S. Kück, FB 4.5, stefan.kueck@ptb.de)

Metrologie für die Gesellschaft

Auf der Zielgrade zur Galileo „In-Orbit Validation“

Die gegenwärtig andauernde Entwicklungsphase von Galileo wird mit der sogenannten „In-Orbit Validation“ abgeschlossen werden. Ein Baustein des benötigten Bodensegments, nämlich ein Teil einer Precise Timing Facility, kommt aus der PTB. Er wird im ersten Quartal 2009 an das Galileo-Kontrollzentrum in Oberpfaffenhofen überführt. (M. Rost, FB 4.4, michael.rost@ptb.de)

Hochstabile mobile Frequenzreferenz

In Zukunft wird es der PTB möglich sein, an jedem beliebigen Ort eine hochstabile Frequenzreferenz zur Verfügung zu stellen. Sie besteht aus einem passiven Wasserstoffmaser und einem GPS-Zeitempfänger. Im Oktober 2008 wurde die Messeinrichtung erstmals im Institut für Quantenoptik der Universität Hannover (IQO) benutzt. Die Einrichtung soll jetzt für Kampagnen zur Validierung der neuen Messeinrichtung mit Instituten, die über Zweiweg-Satelliten-Zeitübertragung (TWSTFT) mit der PTB verbunden sind, sowie für Tests verschiedener Auswerteverfahren genutzt werden. (T. Feldmann, FB 4.4, thorsten.feldmann@ptb.de)

Metrologie für die Wirtschaft

Flüssiglichtleiter unter starker UV-Einkoppelung zeigen deutliche spektrale Transmissionsänderung

In Industrie und Forschung sind für höhere UV-Bestrahlungsstärken Flüssiglichtleiter weit verbreitet. In der PTB wurde erstmalig die zeitliche und spektrale Transmissionsstabilität von Flüssiglichtleitern unter starker UV-Bestrahlung systematisch untersucht. Die Untersuchungen zeigen eine deutliche Abnahme der spektralen Transmission der Lichtleiter in Abhängigkeit vom UV-Strahlungsspektrum und der eingebrachten Strahlungsdosis. (S. Nevas, FB 4.1, saulius.nevas@ptb.de)

Außergewöhnliche Reflexionsgradänderungen in Ulbrichtkugeln unter hoher UV-Bestrahlung

Unter hoher UV-Exposition wurden außergewöhnliche Transmissionsänderungen an mit PTFE beschichteten Ulbrichtkugeln festgestellt, die als Eingangsoptik eines Spektroradiometers benutzt wurden: Es zeigte sich ein beträchtlicher spektral variierender Anstieg der Transmission. Je kürzer die Beobachtungswellenlänge, desto größer ist der Anstieg des beobachteten Transmissionsgrades der Ulbrichtkugeln. Der spektrale und der zeitliche Verlauf der Änderungen der Eigenschaften der Ulbrichtkugeln konnten mit Hilfe von Reflektionsmessungen an ebenen PTFE-Proben bestätigt werden. (S. Nevas, FB 4.1, saulius.nevas@ptb.de)

Hohe UV-Bestrahlungsstärke mit neuen Strahlern: Xe-Hg-Lampen als Transfernormal

Der wachsende Anwenderkreis höherer UV-Bestrahlungsstärken fordert einen neuen Typ von Strahlertransfernormal. Zu diesem Zweck wurden ein Xe-Hg-Lampen-Transfernormal in der PTB entwickelt sowie die wichtigsten Arbeitsparameter des Strahlersystems ausführlich untersucht, wie zeitliche Stabilität, Reproduzierbarkeit, Homogenität des Feldes und Nutzbarkeit. Das entwickelte Strahlersystem ist besonders geeignet für die Kalibrierung hochwertiger Geräte bei höheren UV-Bestrahlungsstärken. (S. Nevas, FB 4.1, saulius.nevas@ptb.de)

Leuchtdioden als photometrische Standards

Neben den bereits in der industriellen Messtechnik eingeführten konfektionierten Leuchtdioden(LED)-Normalen der PTB ist nun in Zusammenarbeit mit der Industrie ein spezieller Kalibrierhalter entwickelt worden, der die Verwendung auch nackter Standard-LEDs als LED-Normale ermöglicht. (A. Sperling, FB 4.1, armin.sperling@ptb.de)

Kommerzielle Kameras in der Radiometrie: Bestimmung der Homogenität von Bestrahlungsstärkefeldern

Für viele radiometrische Anwendungen ist die Kenntnis und Optimierung der Homogenität der benutzten Bestrahlungsstärkefelder von großer Bedeutung. Diese Informationen erhält man normalerweise durch ein langwieriges Ab-scannen der Fläche mit einem Photodetektor. In der PTB wurde gezeigt, wie stattdessen eine kommerziell erhältliche Kamera für die Messung der Homogenität eines Strahlungsfelds im Wellenlängenbereich von 300 nm bis 1100 nm eingesetzt werden kann. Diese kamerabasierte Methode ermöglicht eine Analyse der Feldhomogenität nahezu in Echtzeit. Auf diese Weise werden die Justierung optischer Messplätze wesentlich beschleunigt und die Qualitätskontrolle deutlich vereinfacht. (S. Winter, FB 4.1, stefan.winter@ptb.de)

Start eines BMBF-Verbundprojekts zur Entwicklung von Technologien und Messtechniken im Bereich höchstintegrierter Elektronik

Die Abteilung *Optik* der PTB beteiligt sich an dem vom BMBF geförderten Projekt „Critical Dimension and Registration für die 32 nm Maskenlithographie“. Zusammen mit Industriepartnern (AMTC Dresden, Vistec Semiconductor Systems Weilburg) und den PTB-Abteilungen 5, 7, und 8 werden neue Technologien für die Speicher- und Logik-Chip-Produktion der nächsten Generation entwickelt. In der Abteilung *Optik* werden dazu scatterometrische und mikroskopische Messverfahren erforscht. Nähere Informationen: <http://www.ptb.de/de/aktuelles/archiv/presseinfos/pi2008/pitext/pi080813.html>. (B. Bodermann, FB 4.2, bernd.bodermann@ptb.de)

Entwurf eines hochaperturigen 193-nm-Mikroskops für hochgenaue quantitative Linienbreitenmessungen

Es wurde ein neuartiges optisches Transmissionsmikroskop (Objektivapertur: 0,9, Beleuchtungswellenlänge: 193 nm) für genaue Linienbreitenmessungen entworfen und konstruiert. Eine Rückführung auf die SI-Einheit Meter ist durch ein interferometrisch kontrolliertes Objektraster-Verfahren gegeben. Mit diesem Mikroskop werden quantitative Messungen von Strukturbreiten von 100 nm bis 10 μm mit Messunsicherheiten von 10 nm (95 %-Vertrauensintervall) möglich. (B. Bodermann, FB 4.2, bernd.bodermann@ptb.de)

Zerstörungsfreie Bestimmung von Profilgeometrien von diffraktiven optischen Strukturen mit hohem Aspektverhältnis

Es wurde ein Verfahren entwickelt, mit dem man Profilgeometrien von diffraktiven optischen Strukturen nicht-invasiv, d. h. zerstörungsfrei, bestimmen kann. Bei diesem Verfahren wird ein Replikat der Originalprobe hergestellt und durch entsprechende Probenpräparation ein Profilschnitt der Struktur erzeugt, der quantitativ mit einem Elektronenmikroskop analysiert wird. Es wurden u. a. Profilgeometrien von Quarz-Gittern mit Stegbreiten von 250 nm und Höhen von 1,8 μm bestimmt. (G. Ehret, FB 4.2, gerd.ehret@ptb.de)

Zuverlässige Automobilelektronik durch Eigenspannungsanalyse

Die Lebensdauer von gekapselten Siliciumsensoren für unterschiedlichste Aufgaben in Automobilen ist oft durch Verspannungen begrenzt, die während der Verkapselung entstehen. In der PTB wurde ein spezielles Mikrodiffraktometer entwickelt, mit dem die Spannungsfelder in verkapselten Siliciumchips durch Röntgenbeugungsanalyse zerstörungsfrei gemessen werden können. Zur Bestimmung der Spannungsfelder im einkristallinen Siliciumsubstrat verpackter Chips hat die PTB Arbeitsgruppe 4.33 ein spezielles Mikrodiffraktometer realisiert. (U. Kuetgens, FB 4.3, ulrich.kuetgens@ptb.de)

Ringversuch zur Entwicklung alternativer Standardmaterialien für die ICUMSA Methode GS2-13 zur Farbklassifizierung von Weißzucker

Mit der Abteilung „Produktentwicklung und technischer Service“ der Nordzucker AG wurde ein Ringversuch zur Entwicklung alternativer Standardmaterialien für die ICUMSA Methode GS2-13 (ICUMSA: International Commission for Uniform Methods of Sugar Analysis) zur Farbklassifizierung von Weißzucker durchgeführt. Hierzu wurden für insgesamt 104 Keramiken und Glassinterplatten der Farbtypen 0 und 6 sowie zwei Chargen Zucker gemäß der „Braunschweig Standard-Farbtypenreihe“ das Reflexionsverhältnis bei den Wellenlängen 495 nm und 620 nm gemessen. (A. Höpe, FB 4.5, andreas.hoepe@ptb.de)

Kalibrierung von Leistungsmessgeräten für Diodenlaserstrahlung bis 250 W

Im Rahmen eines Forschungsvorhabens mit einem Industriepartner wurden die Entwicklung, die Erprobung und die Anwendung von Messmethoden und TransfERNormalen für die präzise Messung der Strahlungsleistung von Diodenlasern im Leistungsbereich bis zu 250 W untersucht. Nach Abschluss dieses Projektes können nun Laserleistungsmessgeräte bei den industrierelevanten Wellenlängen 915 nm, 940 nm und 980 nm mit Leistungen bis zu 25 W und bei 808 nm bis zu 250 W in der PTB kalibriert werden. Die Standardmessunsicherheit des Empfängernormals HLR302 der PTB ergibt sich zu 0,2 % für die genannten Wellenlängen und für den Leistungsbereich von 2 W bis 250 W. (F. Brandt, FB 4.5, friedhelm.brandt@ptb.de)

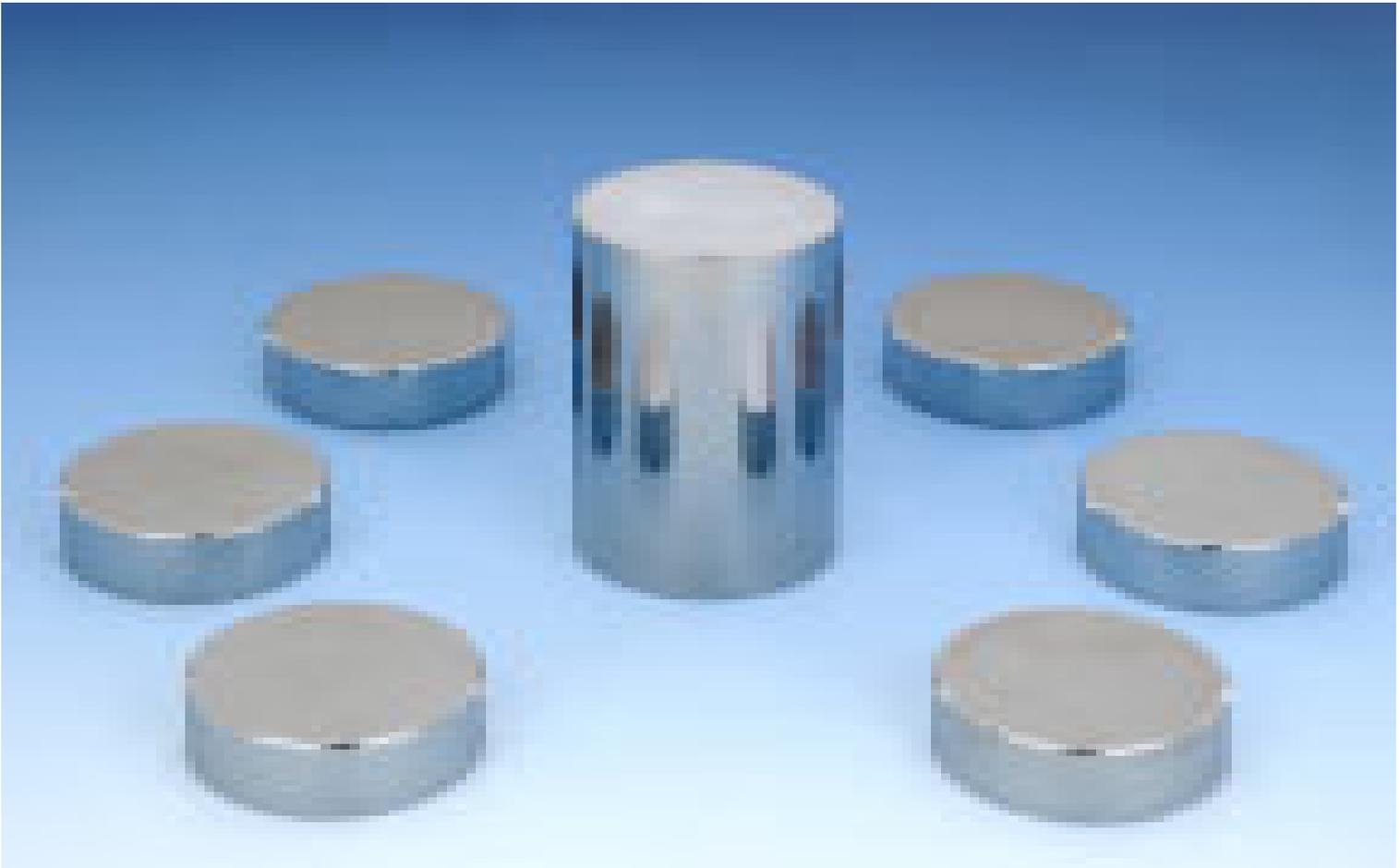
Internationale Angelegenheiten

Schlüsselvergleich zur Messung der mittleren Gitterkonstanten von zweidimensionalen Gittern abgeschlossen

Die PTB hat zusammen mit elf anderen nationalen Metrologieinstituten an einem Schlüsselvergleich zur Messung der mittleren Gitterkonstanten auf zweidimensionalen Gittern teilgenommen. Die in der PTB mit optischer Diffraktometrie ermittelten Messwerte stimmten mit dem internationalen Referenzwert innerhalb von 0,016 nm überein. Der vollständige Bericht ist unter der folgenden Internet-Adresse erhältlich: <http://www.iop.org/EJ/abstract/0026-1394/45/1A/04003> (E. Buhr, FB 4.2, egypt.buhr@ptb.de)

Fertigungs- messtechnik

Berichte der Abteilungen



Abteilung
5

Fertigungs

In der Abteilung *Fertigungsmesstechnik* werden Forschungs- und Entwicklungsaufgaben bearbeitet, die aus anwendungsorientierten Fragestellungen bei der Sicherstellung der Rückführung von dimensionellen Messergebnissen in der industriellen Fertigung resultieren. Wie in allen Bereichen der Fertigungsmesstechnik wachsen auch in der Oberflächenmesstechnik die Anforderungen. Neue Materialien und gestiegene Genauigkeitsanforderungen machen es erforderlich, neben den rein dimensionellen Größen auch materialspezifische Aspekte wie z. B. Härte, E-Modul, Brechzahl und deren Einfluss auf Messgröße und Messunsicherheit zu berücksichtigen.

In der Oberflächenmesstechnik werden sowohl optische als auch taktile Messverfahren eingesetzt. Optische Verfahren haben den Vorzug, berührungsfrei eine große Anzahl von Messpunkten parallel und damit schnell erfassen zu können, weisen aber bei stärker strukturierten und optisch inhomogenen Oberflächen deutliche Nachteile auf, wie z. B. die Beschränkung auf flache Neigungswinkel, Unstetigkeiten bei Kanten, Phasenverschiebung durch optisch transparente Schichten und Phasensprünge durch unterschiedliche Materialien und Schichtsysteme. Taktile Messverfahren gelten hier allgemein als zuverlässiger und haben sich in der Vergangenheit bei Messungen an den konventionellen Materialien der Maschinen- und Automob-

bilindustrie auch vielfältig bewährt. Dies drückt sich z. B. bei der Rauheitsmesstechnik auch in der nationalen und internationalen Normung aus, die sich im Wesentlichen auf taktile Verfahren („Profilometer“) bezieht. Problematisch werden taktile Messungen allerdings dann, wenn weichere Materialien, solche mit stark unterschiedlicher Härte und Elastizität oder stark strukturierte Oberflächen gemessen werden sollen.

Oberflächen aus unterschiedlichen Materialien, wie sie insbesondere bei Mikrosystemen, aber auch makroskopischen Bauteilen auftreten, deformieren beim taktilen Messen in Abhängigkeit vom E-Modul und der Härte, aber auch in Abhängigkeit von der Abtastgeschwindigkeit. Die in den gültigen Normen festgelegten Antastkräfte (750 μN) und Tastspitzenradien ($r_A = 2 \mu\text{m}$) erzeugen derart große Kontaktdrücke, dass die resultierenden Deformationen auf weicheren Materialien (Polymeren, Aluminium, etc.) nicht mehr zu vernachlässigen sind. Sie führen zu systematischen Abweichungen bei den gemessenen Strukturhöhen und letztlich sogar zu Kratzern. Auch auf strukturierten Oberflächen kann es durch Härteinhomogenitäten zu solchen Effekten kommen. Als Beispiel sei hier im Bild 1 das „Ergebnis“ einer Profilometermessung auf einer Feinblechoberfläche mit funktionsorientierter Strukturierung gezeigt. Durch eine offensichtlich zu hohe Auflagekraft hat die Profilometerspitze Spuren hinterlassen; die aus diesen Messungen resultierenden Rauheitswerte sind verfälscht.

Zur Reduzierung solcher Effekte müssen bei den Profilometern kleinere Antastkräfte eingestellt oder andere Verfahren wie z. B. die Rasterkraftmikroskopie angewandt werden. In jedem Fall sind die genaue Einstellung der Antastkraft und deren Rückführung wichtige Voraussetzungen für die Vergleichbarkeit von Messergebnissen. Darüber hinaus ist es notwendig, Verfahren zur Korrektur von Deformationen zu erarbeiten. Hierzu sind genaue

Titelbild:

Herstellung von Siliciummassen zur Bestimmung von Sorptionseffekten durch Schleifen und schrittweisem Polieren mit Diamantpaste und Syton (SiO_2) bis zu einer kleinsten Korngröße von 125 nm.

Der Wägewert des Zylinders aus monokristallinem Si von 438,1 g wurde mit einer Genauigkeit von 5 mg und der Wägewert der sechs Scheiben von je 86,66 g mit einer Genauigkeit von nur 2 mg erzielt.

messtechnik



Bild 1: Feinblechoberfläche mit funktionsorientierter Strukturierung zur verbesserten Tiefziehbarkeit und Lackierbarkeit. Mikroskopische Aufnahme im Auflicht, Hellfeld, 20fache Vergrößerung.

Kenntnisse der mechanischen Eigenschaften von Oberflächenschichten wie dem E-Modul, der Härte und der Fließgrenze notwendig.

Die Abteilung *Fertigungsmesstechnik* erarbeitet Lösungen auf den folgenden Themengebieten:

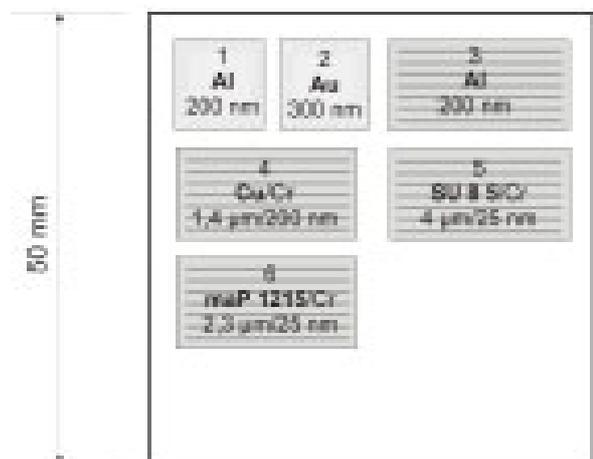
- Einfluss von Tastkräften
- Kalibrierung von Tastkräften oberhalb $1 \mu\text{N}$
- Entwicklung einer Nanokraftmeseinrichtung (Rückführung von Kräften $< 1 \mu\text{N}$).

Bild 2: Prinzipbild der verwendeten Probe mit drei Metallschichtsystemen (Al, Au und Cu) sowie zwei Polymersystemen (Resistmaterialien SU-8 und ma-P) auf Silicium-Substraten mit z. T. dicker Oxidschicht (Schicht 1 und 2) bzw. mit einer zusätzlichen Cr-Lage als Haftschrift (Schicht 4, 5, und 6). Die Si-Chips sind auf eine Glasplatte als Träger aufgeklebt worden.

Einfluss von Tastkräften

Zur Untersuchung der Deformation bei taktilen Messungen ist in der PTB eine spezielle Probe hergestellt worden, die aus Si-Chips mit unterschiedlich dicker Siliciumoxidschicht und mit verschiedenen Metall- und Polymerschichten besteht. Bild 2 zeigt das Prinzipbild mit den unterschiedlichen Schichtsystemen aus Al, Au, Cu und zwei Polymeren. Die Oxidschichtdicke auf den Chips 1 und 2 beträgt 300 nm , während die restlichen Chips nur eine dünne natürliche Oxidschicht aufweisen.

Durch Stufenhöhen-/Schichtdickenmessung d_m bei unterschiedlichen Antastkräften F_1, F_2, \dots lässt sich die Eindringtiefe d_w in Abhängigkeit von der Antastkraft F_A bestimmen (siehe auch Bild 3). Zur Bestimmung der antastkraftabhängigen Deformation bei Tastschnittmessungen wurden Referenzmessungen mit sehr kleinem Kontaktdruck durchgeführt. Für Messkräfte im Bereich weniger Mikronewton bei Verwendung einer Tastspitze mit $2 \mu\text{m}$ Radius oder von $750 \mu\text{N}$ bei einem Tast-



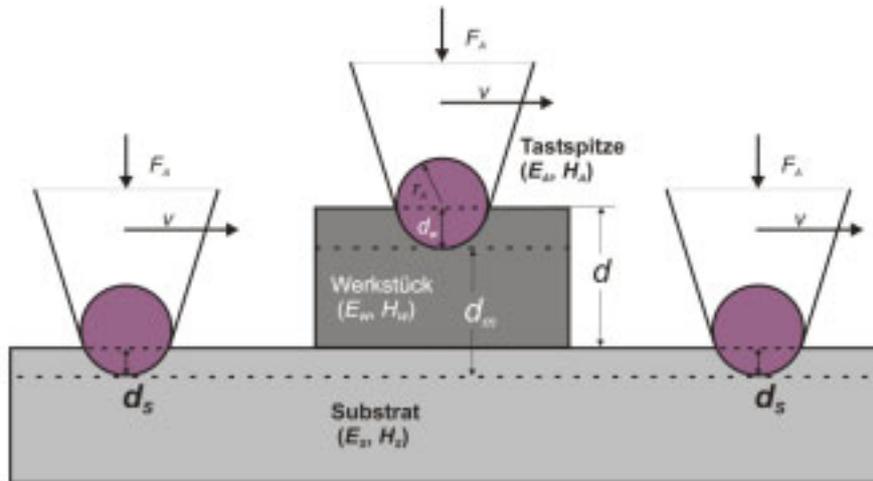


Bild 3:
Antastkraftabhängige Deformationen bei der Tastschnittmessung; F_A : Antastkraft, v : Vorschubgeschwindigkeit, d_m : gemessene Schichtdicke, d : wahre Schichtdicke, d_w : Deformation der Schicht, d_s : Deformation des Substrates; E und H jeweilige Elastizitätsmodule und Härten

spitzenradius im Bereich von 50 μm ist die Deformation mittelharter Materialien kleiner als 2 nm und damit vernachlässigbar, so dass die so gemessene Höhe als Referenzhöhe verwendet werden kann („wahre Schichtdicke“). Um Einflüsse durch unterschiedliche Verfahrensgeschwindigkeit und damit dynamische Kräfte zu reduzieren, sind alle Messungen mit derselben Geschwindigkeit von 50 $\mu\text{m/s}$ durchgeführt worden.

Bild 4 zeigt einige Profile an der Struktur 3 auf der Probe in Bild 2 (streifenförmige Al-Schicht, „Al-Stufe“), die mit verschiedenen Tastkräften aufgenommen wurden.

Aus der gemessenen Schichtdicke, der wahren Schichtdicke und der Deformation des Substrates ergibt sich die Deformation der Schicht:

$$(1) \quad d_w = d - d_m - d_s$$

d_s wird mit Hilfe der Hertzchen Pressung und bekannten Materialdaten des Substrats berechnet, die wahre Schicht-

dicke ist aus Referenzmessungen (s.o.) bekannt.

Die Deformation der Werkstoffschicht d_w wird bei Härtemessungen als Indentation bezeichnet. Bei Indentationen treten neben elastischen und plastischen Verformungsanteilen häufig auch viskose Anteile auf. Bei Härtemessungen erstreckt sich das plastische Fließen manchmal über einige Minuten. Insbesondere bei Polymeren und Gläsern muss von einem nichtlinearen Zusammenhang zwischen Spannung und Dehnungsrate ausgegangen werden [1]. Diese Abhängigkeit der Verformung von der Dehnungsrate kommt bei Tastschnittmessungen durch die Abhängigkeit von der Vorschubgeschwindigkeit v zum Ausdruck. Nach Meinhard [1] lässt sich die folgende Abhän-

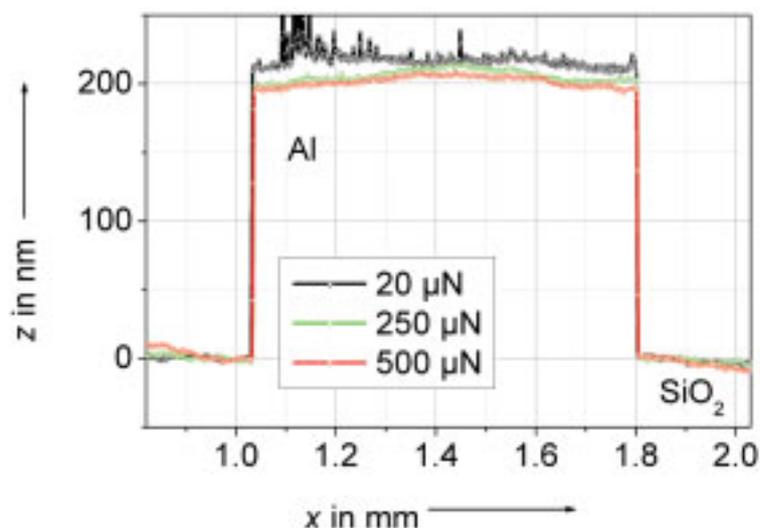


Bild 4:
Tastschnittmessungen einer Al-Schicht mit drei unterschiedlichen Antastkräften (Spitzenradius $r_A = 2 \mu\text{m}$, Vorschubgeschwindigkeit $v = 50 \mu\text{m/s}$).

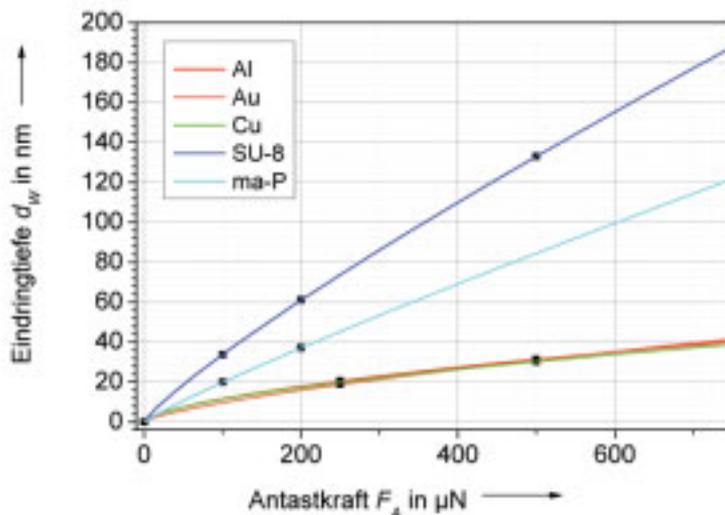


Bild 5: Eindringtiefe d_w in Abhängigkeit von der Antastkraft F_A für verschiedene Schichtsysteme der Probe aus Bild 2 (Messungen mit einem Spitzenradius von $r_A = 2 \mu\text{m}$ bei einer Vorschubgeschwindigkeit von $v = 50 \mu\text{m/s}$). Zu sehen sind Messpunkte und daran gefittete Kurven entsprechend Gl. (2)

gigkeit der Eindringtiefe d_w von der Antastkraft F_A formulieren (Geschwindigkeit v , Fitparameter a und b):

$$(2) \quad d_w(v, F_A) = a(v) \cdot F_A^{h(v)}$$

Bild 5 zeigt die Eindringtiefen d_w und die berechneten Fitkurven für die Messungen an den unterschiedlichen Schichtsystemen der Probe aus Bild 2. Der Verlauf der Messpunkte lässt sich durch Gl (2) gut beschreiben.

Als Fazit der bisherigen Untersuchungen lässt sich feststellen, dass die deformationsbedingten Schichtdickenabweichungen bei Tastschnittmessungen unter Normbedingungen Werte zwischen 10 nm und 20 nm für Metallschichten und Werte von 100 nm und mehr für Polymere erreichen können. Die existierenden statischen Deformationsmodelle reichen zur vollständigen Beschreibung dieser Effekte nicht aus. Sie müssen erweitert werden, um auch Effekte der dynamischen Abtastung berücksichtigen zu können.

Es ist deutlich gezeigt worden, dass die reproduzierbare Einstellung der Antastkraft bei taktilen Methoden für reproduzierbare Messungen unabdingbar ist – für quantitative Aussagen ist darüber hinaus eine rückführbare Kalibrierung der Tastkräfte erforderlich. Hierzu sind in der PTB im Rahmen verschiedener Projekte Einstellnormale und Verfahren zur Kalibrierung entwickelt worden.

Kalibrierung von Tastkräften oberhalb $1 \mu\text{N}$

Die Antastkräfte von Tastschnittgeräten, Koordinatenmessgeräten und Härtemessgeräten können mit Hilfe von Silicium-Mikrokrafteinstellnormalen (Bild 6) durch einfache Profilmessungen bestimmt werden. Die Kalibrierung dieser Normale selbst erfolgt in der PTB mit einer Mikrokraftmesseinrichtung. Sie besteht aus einer Präzisionsverstelleinrichtung und einer Präzisionswaage (Kompensationsprinzip) – siehe dazu Bild 7.

Relative Unsicherheiten der gemessenen Federkonstante von 2 % können erreicht werden.

Die Kompensationswaage verfügt über eine Auflösung von 1 nN, eine Reproduzierbarkeit von 2,5 nN und über Linearitätsabweichungen von 9 nN. Mit dieser Einrichtung können neben den beschriebenen Einstellnormalen auch Cantilever von Rasterkraftmikroskopen und weitere Kraftsensoren kalibriert werden.

Literatur

[1] H. Meinhard: *Rheologische Untersuchungen zu Härteeindruckexperimenten im Nanometerbereich*. Dissertation, Mathematisch-Naturwissenschaftlich-Technische Fakultät, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, 1999

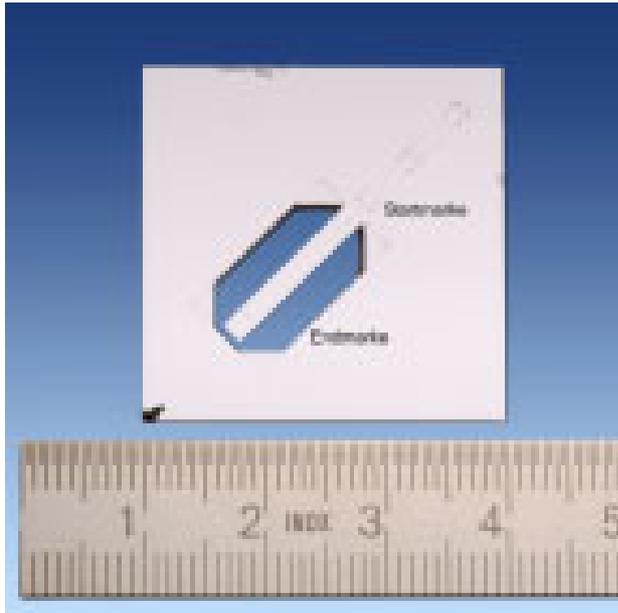


Bild 6: Silicium-Mikrokraft-Einstellnormal. Zu sehen ist der Biegebalken, der durch Ätzen aus dem Substrat freigelegt wurde. Die Biegesteifigkeit ist in einer Mikrokraftmesseinrichtung kalibriert worden. Der Biegebalken wird durch das Profilometer von der Startmarke bis zur Endmarke abgefahren, und aus der Durchbiegung wird auf die jeweilige Kraft geschlossen.

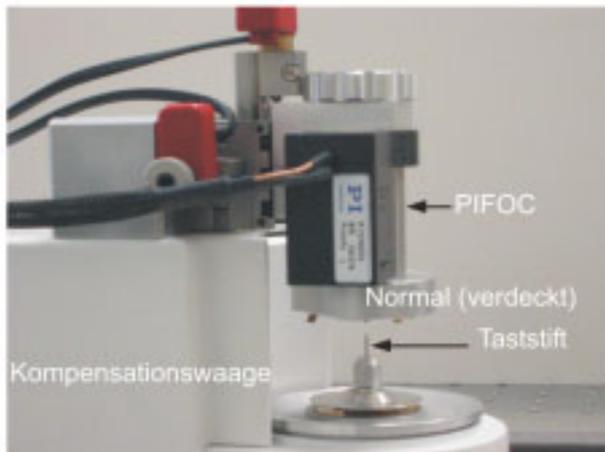


Bild 7: Mikrokraft-Kalibriereinrichtung, bestehend aus einer Kompensationswaage („SC2“ der Firma Sartorius) und einem linearen Verstellsystem („PIFOC“ der Firma PI). Sie ist für Weg-Kraft-Kalibrierungen geeignet; Kräfte von 20 mN bis 1 nN und Auslenkungen von 80 µm bis 1 nm können gemessen werden

Entwicklung einer Nanokraftmesseinrichtung

Bei noch kleineren Kräften, wie sie z. B. im Bereich der Rastersondenmikroskopie zur Untersuchungen von Materialeigenschaften, in der Chemie und Biotechnologie benutzt werden, sind die Kalibrierung und insbesondere die Rückführung auf die Einheit der Kraft besonders schwierig und noch nicht sichergestellt. Für quantitative, reproduzierbare und vergleichbare Messungen im Bereich der Forschung ist dieser Zustand problematisch – eine Qualitätssicherung in der Industrie lässt sich auf dieser Grundlage nicht durchführen.

Die Biegesteifigkeit von Cantilevern in Rastersondenmikroskopen wird auf unterschiedliche Art und Weise bestimmt: durch Berechnung aus geometrischen Abmessungen und

Materialkonstanten, aus direkter Kraftkalibrierung mit Hilfe von Waagen, Federn, Massen, Referenz-Cantilevern oder aus der Analyse des Resonanzverhaltens oder des Rauschspektrums der Cantilever. Alle verfügbaren Methoden sind im Nanonewtonbereich sehr ungenau. Unsicherheiten – je nach Methode – von bis zu 100 % oder mehr können auftreten. Einflüsse durch die Umgebungsbedingungen (Temperatur, Feuchte, etc.) spielen eine große Rolle. Es gilt also eine direkte Rückführung auf Nanokräfte über eine Normalmesseinrichtung und geeignete TransfERNormale zu ermöglichen.

Eine Einrichtung zur Messung quasistatischer Kräfte $< 10 \mu\text{N}$ mit einer Auflösung von 50 pN wird derzeit in der PTB entwickelt. Sie eignet sich neben der Rückführung und Weitergabe kleiner Kräfte auch zur Untersuchung anderer wissenschaftlicher Themen, wie z. B.

- Untersuchung des Casimireffektes
- Direkte Messung der Strahlungsleistung
- Vergleichsmessungen von Gewichtskraft und elektrostatischer Kraft (Präzisionsmessung der Permittivität des Vakuums ϵ bei Frequenzen $f < 1$ Hz „Dispersion des Vakuums“).

Prinzip

Das in der Messeinrichtung angewendete Messprinzip (Bild 8) basiert auf einer Pendelscheibe mit elektrostatischer Steifigkeitsreduzierung und einer elektrostatischen Kraftkompensation.

Zur Reduzierung der thermischen Drift sowie des seismischen Rauschens besteht die neue Einrichtung aus zwei identischen Messkanälen, d.h. zwei identischen Pendelsystemen (Bild 9 und 10). Die zu messende Kraft wird nur auf das Mess-Pendelsystem aufgebracht – das Messergebnis ergibt sich immer aus der Differenz zwischen Mess- und Referenzkanal.

Beide Kanäle basieren jeweils auf einem leitenden Scheibenpendel, das zwischen zwei Platten aufgehängt ist. Die Platten und das

Pendel bilden jeweils zusammen zwei Plattenkondensatoren. Zwischen den parallelen Platten und dem Scheibenpendel wird eine Gleichspannung angelegt, mit deren Hilfe die Steifigkeit des Scheibenpendels im Bereich von 0,13 N/m bis hinunter zu 0,007 N/m reduziert werden kann. Jede dieser parallelen Platten besteht aus vier Ringsegmenten, wobei jedes Segment als kapazitiver Sensor für die präzise, parallele Ausrichtung der Platten relativ zur Pendelscheibe benutzt werden kann. Zur Bestimmung der Hauptparameter der Nanokraftmesseinrichtung sind spektrale Methoden sowie ein neuartiger Algorithmus für digitale Signale zur optimalen Stabilisierung der Pendelposition entwickelt worden. Ferner wurden Regelkreise, bestehend aus interferometrischer Messung der Auslenkung und elektrostatischer Kompensierung, aufgebaut. Die Differenz zwischen den Kompensationsspannungen des Messscheibenpendels und des Referenzscheibenpendels wird verwendet, um die anliegende Kraft zu bestimmen.

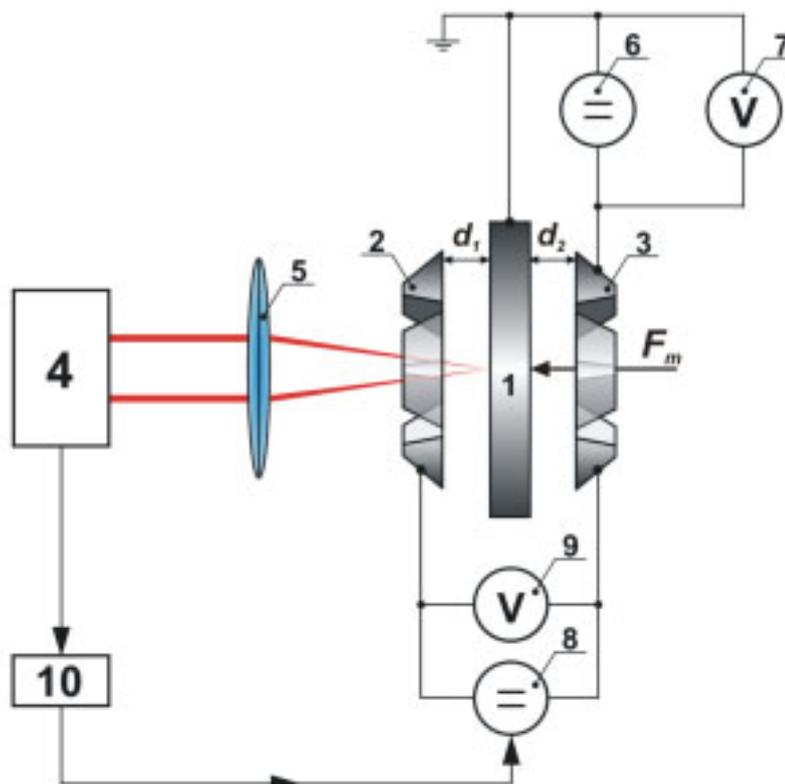


Bild 8: Prinzipbild der Messeinrichtung (F_m : zu messende Kraft, (1) vergoldetes Scheibenpendel aus Aluminium, (2, 3) vergoldete äußere Platten aus Kupfer, (4) Interferometer, (5) Linse, (6) Gleichspannungsquelle für Steifigkeitsreduktion, (8) Kraftkompensationsspannung, (7, 9) Präzisions-Voltmeter, (10) Kraftkompensationsregler)

Bild 9:
Nanokraftmesseinrichtung
bestehend aus Referenz- und Mess-
scheibenpendel

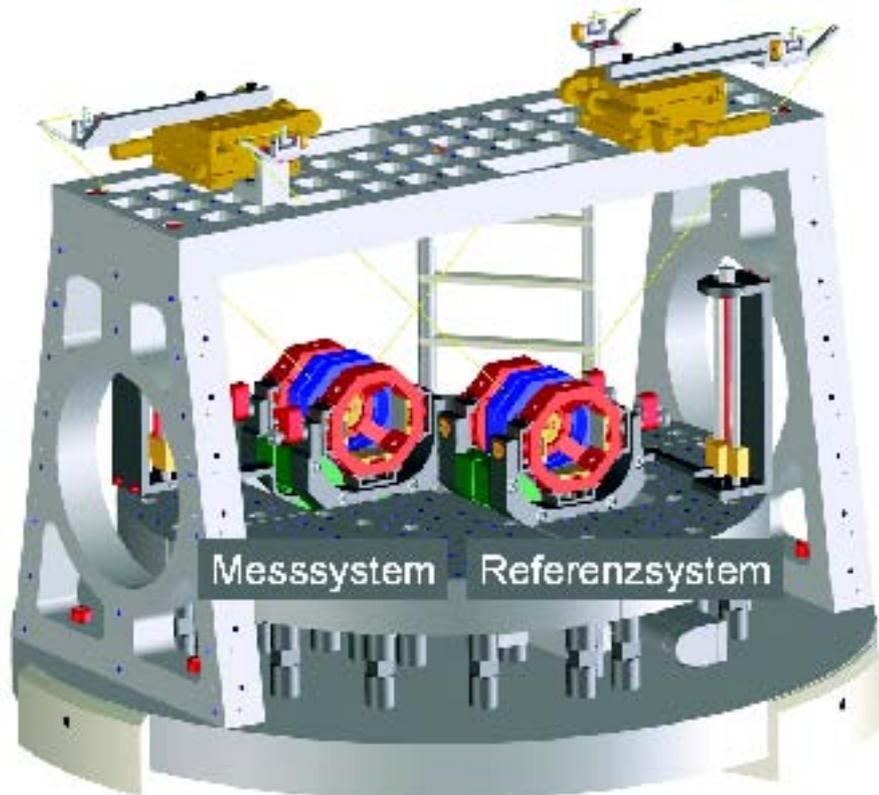
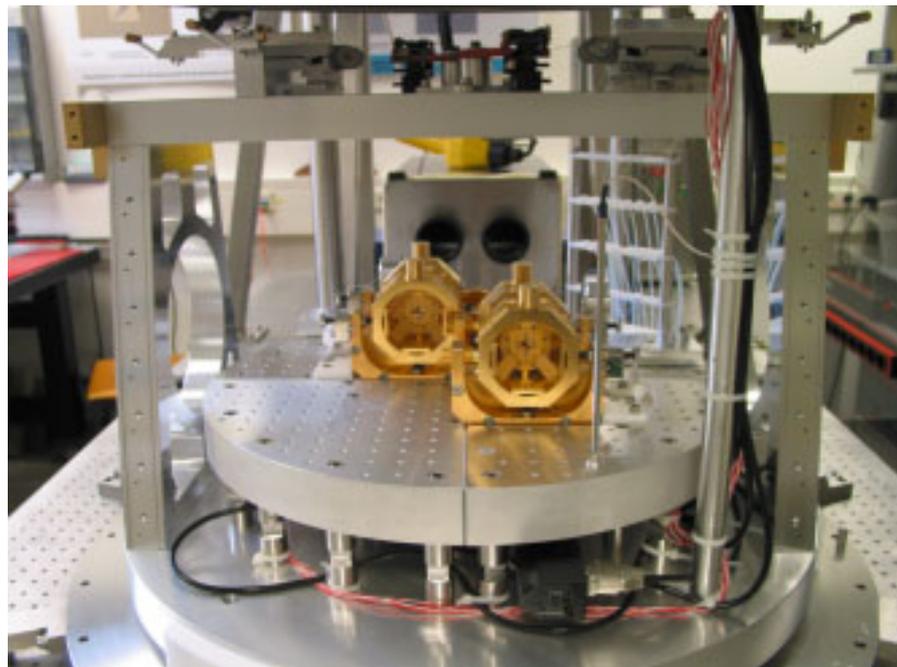


Bild 10: Foto der Nano-
kraftmesseinrichtung;
zu sehen sind die bei-
den Messkanäle (ver-
goldete Bauteile)



Erste Ergebnisse

Erste Rauschmessungen an Luft ergaben eine Standardabweichung von 42 pN bei Mittelungszeiten von 50 s und von 160 pN bei einer Langzeitmessung über 3 Stunden.

Als erste Nanokraftmessung an der Grenze der Empfindlichkeit des Prototypsystems wurde die Kraft aufgrund des Lichtdruckes eines He-Ne-Lasers nachgewiesen. Diese

Messung zeigte, dass man mit der Nanokraftmesseinrichtung die kleinen, periodisch eingebrachten Lichtkräfte (ca. 47 pN) nachweisen und bestimmen kann (s. Bild 11). Durch weitere Optimierung lassen sich sowohl die Empfindlichkeit als auch die Messunsicherheit noch wesentlich verbessern.

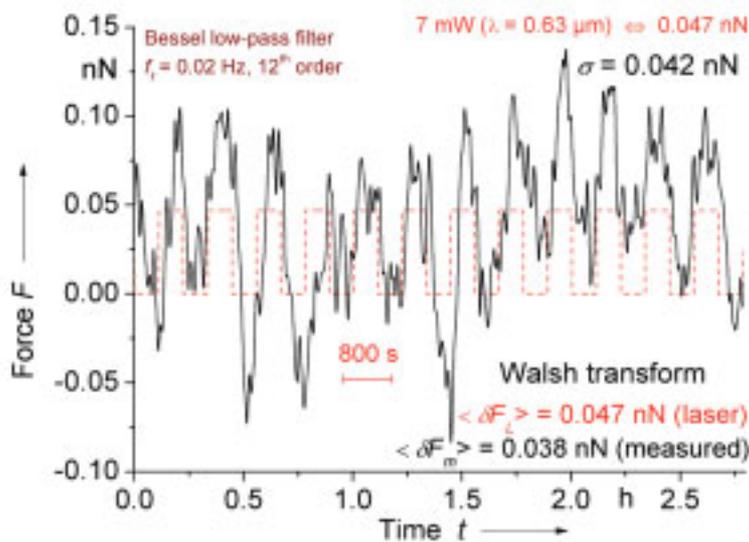


Bild 11: Nachweis kleiner, periodisch eingebrachter Lichtkräfte eines HeNe-Lasers mit einer Leistung von 7 mW. Die schwarze Kurve zeigt die gemessene Kraft, die gestrichelte rote Kurve die berechnete Lichtdruckkraft als Funktion der Messzeit.

Darüber hinaus bietet diese Messeinrichtung das Potential zur Präzisionsmessung der Permittivität ϵ der Luft (bzw. des Vakuums) bei Frequenzen $f < 1$ Hz. Hierzu wurde eine neue Messmethode entwickelt. Erste Messungen konnten mit einer relativen Messunsicherheit von 3 % ausgeführt werden. Auch diese Messungen wurden an Luft durchgeführt; das Prototypsystem ist aber für Vakuumbetrieb geeignet und entsprechende Messungen werden folgen.

Ausblick

Forschungs- und Entwicklungsschwerpunkte im Bereich der Oberflächenmesstechnik der Abteilung sind die weitere Optimierung der bestehenden Nanokraftmesseinrichtung, Untersuchungen von geeigneten Krafttransfernormalen und Entwicklung von verbesserten Simulationsmodellen zur Beschreibung der Sensor-Oberfläche-Wechselwirkung.

Ziele sind die Realisierung einer Normalmesseinrichtung zur Rückführung kleiner Kräfte bis in den Sub-Nanonewtonbereich und die Weitergabe der (Nano)Krafteinheit mittels geeigneter Transfernormale. Oberhalb von 1 nN können dies Referenzfedersysteme, z. B. auf der Basis von MEMS sein. Für Kräfte kleiner als 1 nN könnten Laser (Lichtdruckkräfte) als Transfernormale zum Einsatz kommen. Validierte Simulationsmodelle zur quantitativen Beschreibung der Sensor-Oberfläche-Wechselwirkung sollen dazu beitragen, die Unsicherheit in der Oberflächenmesstechnik weiter zu senken.

In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

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

Grundlagen der Metrologie

Entwicklung eines Nanoindentors auf der Grundlage eines MEMS

Ein miniaturisierter Nanoindentor, der auf einem mikroelektromechanischen System (MEMS) beruht, ermöglicht In-situ-Messungen der mechanischen Eigenschaften von Kunststoffen und Metallen. (K. Herrmann, FB 5.1, konrad.herrmann@ptb.de)

Ellipsometrische Bestimmung der Oxidschichtdicke an AVO-28#8

Es wurden ellipsometrische Messungen an der isotoopenreinen ^{28}Si -Kugel des Avogadroprojekts durchgeführt. Mit Hilfe von ca. 1600 Einzelmessungen wurde die mittlere Schichtdicke der nativen Oxidschicht bestimmt. (I. Busch, FB 5.1, ingo.busch@ptb.de)

Realisierung des Nanozugversuchs an ultradünnen Schichten

Mit einem MEMS-basierten Nanozug-Versuchssystem ist es möglich, die Zugeigenschaften freistehender Schichten mit einer Dicke im Nanometerbereich zu bestimmen. (K. Herrmann, FB 5.1, konrad.herrmann@ptb.de)

Einfluss des optischen Systems beim Kugelinterferometer auf die Durchmesserbestimmungen von Siliciumkugeln

Mit dem Kugelinterferometer der PTB lässt sich durch den im Sichtfeld zweidimensional ausgedehnten Messbereich der Einfluss des optischen Systems auf die gemessenen Kugeldurchmesserwerte untersuchen. Entsprechende Messreihen wurden durchgeführt, ohne dass sich hierbei signifikante Beiträge für die Kugeldurchmesser-Messergebnisse zeigten. (G. Bartl, FB 5.4, guido.bartl@ptb.de)

Interferometrie für geodätische Längen

Eine verbesserte Methode der Zweifarben-Interferometrie zur Kompensation des Einflusses des Brechungsindex' der Luft wurde für Längenmessungen bis zu 50 m eingesetzt und soll im Rahmen einer EU-Kooperation auf Längen bis zu 1 km ausgedehnt werden. Durch Messung von Luftdruck und -feuchte lässt sich hierbei die Lufttemperatur aus den mit beiden Farben gemessenen Längen berechnen. (K. Meiners-Hagen, FB 5.4, karl.meiners-hagen@ptb.de)

Neues Ultrapräzisionsinterferometer zur Längenmessung von prismatischen Körpern

Gegenüber dem bewährtem PTB-Präzisionsinterferometer bietet das neue Ultrapräzisionsinterferometer zur Längenmessung prismatischer, endmaßförmiger Körper mehrere messtechnische Vorteile, u. a. die Realisierung des schnellen DFT-Verfahrens zur Phasenauswertung der Interferenzbilder. (R. Schödel, FB 5.4, rene.schoedel@ptb.de)

Konverterfolien für das Orbital-Projekt „AIDA“

Im Rahmen einer Machbarkeitsstudie für ein DLR-Projekt zur kalorimetrischen Messung von orbitalen Partikeln wurde eine Methode entwickelt, dünne Gold-Folien ($50\ \mu\text{m}$) mittels eines Lasers und einer Präzisionsrobotik zu strukturieren. (D. Hagedorn, FB 5.5, daniel.hagedorn@ptb.de)

Entwicklung der Fertigungstechnologie für das Orbital-Projekt „Microscope“

Im Wissenschaftlichen Gerätebau erfolgt zurzeit die Fertigungsentwicklung zur Herstellung von Testmassen für das ESA-Projekt „Microscope“ zur Überprüfung des Äquivalenz-Prinzips mit einer Genauigkeit von 10^{-15} . (D. Hagedorn, FB 5.5, daniel.hagedorn@ptb.de)

Metrologie für die Wirtschaft

Entwicklung eines kompakten SPM-Messkopfes

In Zusammenarbeit mit dem Nanoscience Laboratory in Taipei, Taiwan, wurde ein kompakter und flexibel einsetzbarer SPM-Messkopf (scanning probe microscope) entwickelt, der auf der optischen Detektionseinheit eines DVD-Lesekopfes basiert und sowohl im „contact“- und „intermittent contact“-Modus als auch in einem schnellen optischen Profilometer-Modus zu betreiben ist. (H.U. Danzebrink, FB 5.2, hans-ulrich.danzebrink@ptb.de)

Richtlinie über die Grundkalibrierung von Rastersondenmikroskopen

Eine Richtlinie zur Grundkalibrierung von Rasterkraftmikroskopen (VDI/VDE 2656 Blatt 1) ist verfügbar. Sie beschreibt die Verfahren zur Charakterisierung von Rasterkraftmikroskopen und deren Kalibrierung über Normale bezüglich der Anwendung auf die Messung geometrische Größen. Die Richtlinie wurde zusammen mit Fachleuten aus Industrie und Forschung im Ausschuss VDI-GMA 3.41 „Geometrische Messgrößen, Normale, Kalibrierung“ erarbeitet. (L. Koenders; T. Dziomba; FB 5.1, ludger.koenders@ptb.de)

Piezoresistive Rauheitssensoren für die Messung in Einspritzdüsen

Im Rahmen eines BMBF-Verbundprojektes wurden piezoresistive Siliciumsensoren für die Messung in Einspritzdüsen mit Durchmessern von minimal 60 µm entwickelt und erfolgreich im industriellen Einsatz erprobt. (U. Brand, FB 5.1, uwe.brand@ptb.de)

Charakterisierung eines neu entwickelten Tastsystems für kombinierte Kontur- und Rauheitsmessungen

Für die Untersuchung der messtechnischen Eigenschaften eines hochauflösenden, taktil messenden Tastsystems für kombinierte Kontur- und Rauheitsmessungen der Firma Hommel-Etamic, das auf einem Winkelmesssystem basiert, wurde ein in der PTB entwickeltes Messprinzip zur Vermeidung von für die Winkelmessung typischen Exzentrizitätsfehlern realisiert. (A. Just, FB 5.2, andreas.just@ptb.de)

Kontrastsimulationen an Alignment-Markerstrukturen für die Elektronenstrahl-Lithografie

Im Rahmen einer Industriekooperation wurden Simulationen des Kontrastes der rückgestreuten Elektronen an speziellen Markerstrukturen durchgeführt, die in der Elektronenstrahl-Lithografie für die präzise Waferpositionierung beim Direktschreiben verwendet werden. (C.G. Frase, FB 5.2, carl.g.frase@ptb.de)

Metrologie für neue Messtechniken in der Industrie

Der Fachbereich *Koordinatenmesstechnik* ist Koordinator eines neuen europäischen Forschungsprojektes „Metrology for New Industrial Measurement Technologies“ (NimTech). Zusammen mit vier weiteren Metrologieinstituten wird untersucht, wie die Rückführung von neuartigen Messsystemen zur mobilen und flexiblen Messung großer Strukturen mit Abmessungen bis zu mehreren 10 Metern direkt im Fertigungsumfeld sichergestellt werden kann. (F. Härtig, FB 5.3, frank.haertig@ptb.de)

Technologietransfer des 3D-Mikrotasters in die Industrie

Der in der PTB entwickelte 3D-Mikrotaster wurde erfolgreich in die Industrie transferiert und im Rahmen der Control 2008 der Öffentlichkeit vorgestellt. Die Bildverarbeitungsalgorithmen zur Auswertung der für dieses Messverfahren charakteristischen Speckle-Muster wurden derart beschleunigt, dass der Taster nun auch für scannende Messungen eingesetzt werden kann. (U. Neuschäfer-Rube; M. Wissmann, FB 5.3, ulrich.neuschaeferrube@ptb.de, frank.wissmann@ptb.de)

„VCMM-Gear“ – Automatische Messunsicherheitsermittlung in der Verzahnungsmesstechnik

Zur Ermittlung der aufgabenspezifischen Messunsicherheit von 3D-Verzahnungsmessungen wurde das in der Koordinatenmesstechnik etablierte Verfahren des Virtuellen KMG (VCMM) um die verzahnungstypischen Einflussgrößen, wie Drehtisch, Aufspannung und Scanning, erweitert und angepasst. Erste Vergleichsmessungen haben plausible Ergebnisse geliefert. (K. Rost, FB 5.3, kerstin.rost@ptb.de)

3D-Mikro-Messungen höchster Genauigkeit

Ein neues Mikro-Koordinatenmessgerät wurde mit geeigneten Referenznormalen hinsichtlich seiner Leistungsfähigkeit für Messungen an Mikrobauteilen mit Außen- und Innengeometrien und für Formmessungen untersucht. Die Ergebnisse zeigten sehr gute Übereinstimmungen mit den Referenzwerten im Bereich von 100 nm und, speziell für Formmessungen, auch noch darunter. (M. Neugebauer, FB 5.3, michael.neugebauer@ptb.de)

Form- und Durchmessermessung an dünnen Zylindern mittels Diodenlaserinterferometrie

Ein Messverfahren zur berührungslosen nicht-scannenden Formmessung dünner Zylinder mittels Mehrwellenlängeninterferometrie wird entwickelt. Erste Messergebnisse zeigen, dass mit dieser Methode die Oberflächenbeschaffenheit zylindrischer Objekte mit einer Auflösung von wenigen Nanometern gemessen werden kann. (A. Höink, FB 5.4, alexander.hoeink@ptb.de).

Vorrichtung zur Ermittlung von Reibkräften in miniaturisierten Wälzführungen

Eine neu entwickelte Vorrichtung zur Ermittlung von Reibkräften ermöglicht die Untersuchung des Reibverhaltens von miniaturisierten Linearlagern über einen breiten Geschwindigkeits- und Verschiebungsbereich. (R. Meeß, FB 5.5, rudolf.meess@ptb.de)

Metrologie für die Gesellschaft

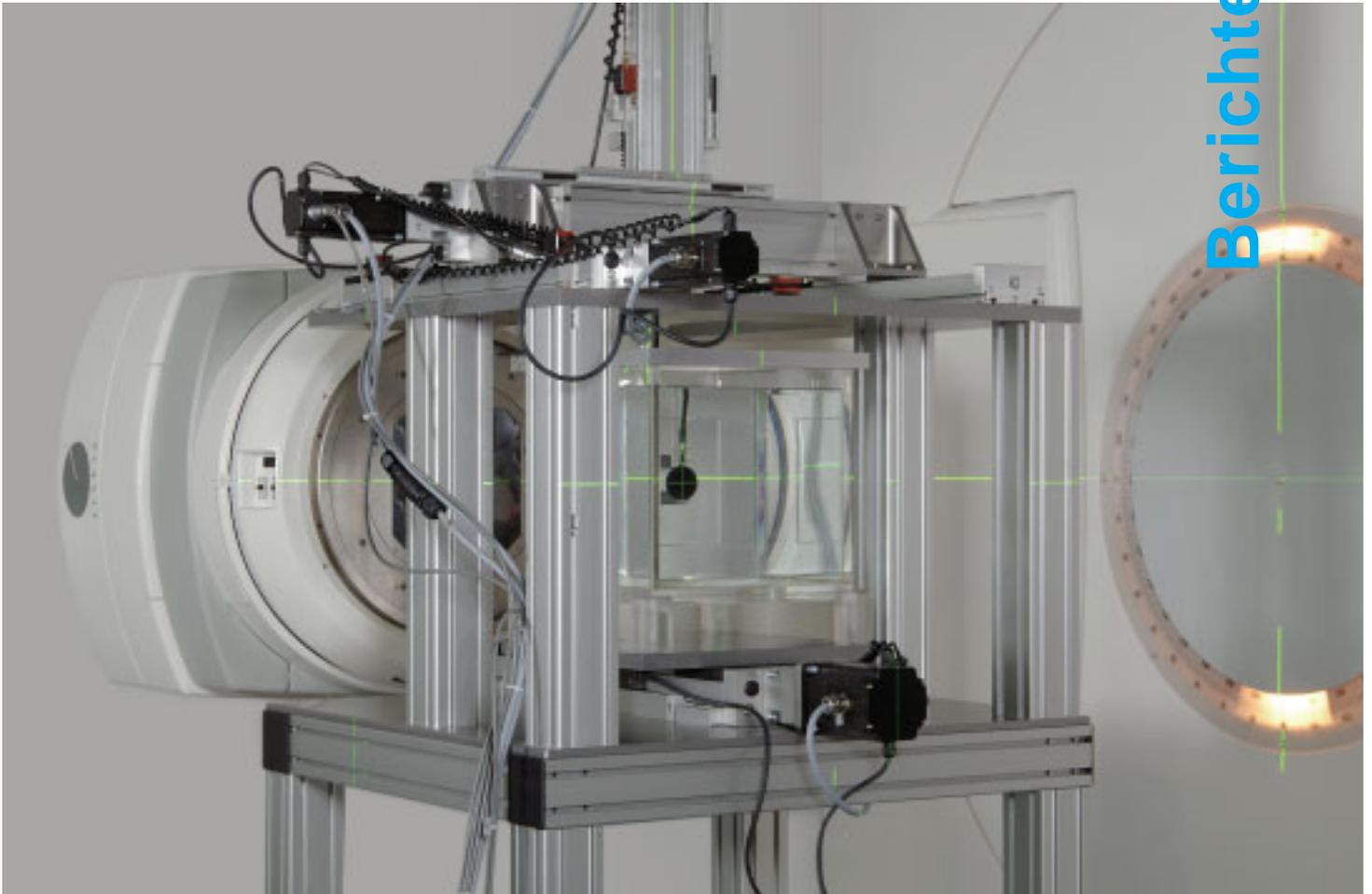
Neue Verfahren bei der Rundholzvermessung im Rahmen eichpflichtiger Längenmessung

Augrund wachsender Anforderungen bei der Rationalisierung und Nutzungs-Optimierung des Rohstoffes Holz wollen Hersteller von Rundholzmessanlagen neue Wege beschreiten. Ein neues Verfahren ist unter den Schlagworten „Rotierende Kluppe“ oder „Vollkonturmessung“ bekannt geworden und wurde von der PTB geprüft. (I. Lohse, FB 5.4, ingo.lohse@ptb.de)

Konstruktion und Fertigung einer Photonenbestrahlungsanlage

In Zusammenarbeit mit dem Fachbereich 6.3 *Strahlenschutzdosimetrie* wurde eine 120-kV-Photonenbestrahlungsanlage konstruiert und gefertigt, die eine definierte Bestrahlung von Messgeräten (Orts- und Personendosimeter) zur Kalibrierung und Bauartzulassung im Rahmen des Strahlenschutzes sowie zur Darstellung von Photonen-Referenzstrahlungsfeldern ermöglicht. (E. Luiken, FB 5.5, enno.luiken@ptb.de)

Ionisierende Strahlung



Abteilung



6

Ionisierende

Die Arbeiten zum Thema Ionisierende Strahlung sind in sechs Fachbereichen organisiert. Zu den Basisaufgaben gehören die Darstellung und die Weitergabe der SI-Einheiten der Aktivität, der Teilchenfluenz, der Luftkerma, der Energiedosis und der Äquivalentdosis. Für diesen Zweck werden Primär- und Transfornormale entwickelt und bereitgestellt, welche die heutigen und die für die Zukunft absehbaren Anforderungen erfüllen. Dafür betreibt die PTB aufwendige Einrichtungen zur Erzeugung von Referenzstrahlungsfeldern mit zum Teil einzigartigen Feldeigenschaften.

In diesem Jahr konnte die neue Elektronenbeschleuniger-Anlage mit ihren drei Beschleunigern in Betrieb genommen werden. Neben der aufwendigen Charakterisierung der Strahlungsfelder an den beiden medizinischen Beschleunigern wird die Anlage zur Entwicklung dosimetrischer Methoden und geeigneter Normale für moderne Bestrahlungsmethoden der Tumorthherapie eingesetzt. Die besonderen Herausforderungen an die Dosimetrie ergeben sich aus der Nutzung kleiner Strahlungsfelder mit starken Dosisgradienten. Dieses international als besonders wichtig eingestufte Forschungsprogramm wird im Rahmen des ERA-NET-PLUS Programms durch die Europäische Kommission gefördert.

Im Folgenden werden einige besondere Entwicklungen und wichtige Ergebnisse zum Themenbereich Ionisierende Strahlung vorgestellt.

Titelbild:

Wasserphantom mit Ionisationskammer zur Dosismessung vor dem neuen klinischen Elektronenbeschleuniger „Elekta Precise“. Die grünen Laserstrahlen kreuzen sich am Messort im Wasser.

Photonenreferenzstrahler für die Kalibrierung von Oberflächenkontaminationsmonitoren

Oberflächenkontaminationsmonitore stellen ein grundlegendes Werkzeug für den praktischen Strahlenschutz dar. Sehr häufig werden gasgefüllte Detektoren oder Szintillationszähler als mobile Handsonden oder als Hand-Fuß-Kleider-Monitore eingesetzt, um potentielle Kontaminationen aufspüren zu können. Um zuverlässige und aussagekräftige Ergebnisse zu bekommen, ist eine regelmäßige Kalibrierung und Überprüfung der Geräte mit Hilfe von Referenzstrahlern erforderlich.

In der PTB werden seit langem Kalibrierungen flächenhafter Referenzstrahler hinsichtlich der Aktivität, der Emissionsrate sowie des Alpha- bzw. Beta-Teilchenflusses an der Quellenoberfläche durchgeführt. Eine Möglichkeit, flächenhafte Photonenstrahler gemäß der ISO-Norm 8769 zu charakterisieren, besteht bisher nicht. Aufgrund der zunehmenden Nachfrage nach entsprechenden Kalibrierungen entwickelt die PTB in Zusammenarbeit mit einem namhaften Hersteller kommerzieller Kalibrierquellen einen neuen Messplatz, der Photonenfluss- und Aktivitätsbestimmungen flächenhafter Quellen rückführbar auf die Aktivitätsnormale der PTB gestattet. Mit einem Blendensystem sollen die Quellen außerdem hinsichtlich der Homogenität der Aktivitätsverteilung (*uniformity*) untersucht werden können. Als Ergänzung dazu kann die Homogenität auch mit Hilfe eines digitalen Autoradiographiesystems untersucht werden. Nach Abschluss des Projekts wird die PTB als erstes nationales Metrologie-Institut entsprechende Kalibrierungen von Klasse-1-Photonenreferenzstrahlern nach der ISO-Norm 8769 anbieten können.

e Strahlung

Internationales Forum für Umweltradioaktivität in der PTB

Vom 22. bis 26. September fand in der PTB die fünfte *International Conference on Radionuclide Metrology – Low-Level Radioactivity Measurement Techniques* (ICRM-LLRMT) statt, an der 120 Wissenschaftler aus 25 Ländern teilnahmen (Bild 1). Im Fokus der Konferenz standen Mess-, Analyse- und Kalibrierverfahren für die genaue Bestimmung kleinster Mengen an Radionukliden in Umweltproben, Industrieprodukten und speziellen Proben aus dem Bereich der Grundlagenforschung. Weitere Themen waren nationale und internationale Vergleichsmessungen zur Verbesserung der Qualität von Radioaktivitätsmessungen. Wie auch die Vorgängerkonferenzen diente diese Veranstaltung dem wissenschaftlichen Austausch zwischen den Teilnehmern aus unterschiedlichen Bereichen wie nationalen Metrologieinstituten, Universitäten, Forschungszentren und Radioaktivitäts-Messlaboratorien.



Bild 1: Teilnehmer der ICRM-LLRMT-Konferenz

Kalorimetrische Bestimmung der Wasser-Energiedosis im Nahfeld von ^{192}Ir -Brachytherapiequellen

Messgröße in der Dosimetrie von Brachytherapiequellen ist die Wasser-Energiedosisleistung, \dot{D}_w , in 1 cm Abstand vom Aktivitätsschwerpunkt des Strahlers senkrecht zur Quellenachse. Bislang wird diese Messgröße indirekt über die Messung der Reference Air Kerma Rate in 1 m Abstand vom Aktivitätsschwerpunkt des Strahlers und unter Verwendung eines meist berechneten Dosiskonversionskoeffizienten bestimmt. Dieses Verfahren führt zu Standardmessunsicherheiten für \dot{D}_w von mehreren Prozent. Mit Hilfe eines Wasserkalorimeters lässt sich die gewünschte Messgröße direkt und mit geringerer Standardmessunsicherheit bestimmen. Als erster Schritt wurde ein in der PTB existierendes Wasserkalorimeter für die Anwendung mit ^{192}Ir -Brachytherapiequellen so modifiziert, dass die Wasser-Energiedosisleistung im Nahfeld der Quelle bestimmt werden konnte.

Das verwendete Wasserkalorimeter wird bei einer Wassertemperatur von 4 °C betrieben und ist weitgehend baugleich mit dem in der PTB als Primärnormal-Messeinrichtung für die Darstellung der Einheit der Wasser-Energiedosis bei ^{60}Co -Strahlung verwendeten Kalorimeter. Mit Hilfe eines Afterloaders wird die Brachytherapiequelle durch einen Teflon-Katheter in das Kalorimeter-Außengehäuse und weiter bis in das Wasserphantom des Kalorimeters transportiert. Der Teflon-Katheter führt im Bereich des kalorimetrischen Detektors zu einer am Ende geschlossenen Edelstahlnadel, die mit Hilfe von zusätzlichen Plexiglasstreben vor bzw. hinter dem wassergefüllten Glaszylinder des Detektors fixiert werden kann. So können zwischen der Edelstahlnadel und den in den Spitzen von Glaspipetten eingeschmolzenen Thermistoren des Detektors Abstände von 24,35 mm bis ca. 48 mm realisiert werden (siehe Bild 2).

Bei der kalorimetrischen Bestimmung der Wasser-Energiedosisleistung müssen die während der Messungen auftretenden Wärmeleitungseffekte korrigiert werden. Ursache der Wärmeleitungseffekte sind sowohl die Absorption der Strahlung innerhalb der Quelle und ihrer Kapselung, die z. B. für eine 350 GBq ^{192}Ir -Quelle zu einer Eigenheizung mit ca. 21 mW führt, als auch die steile Tiefendosisverteilung im Bereich des Messortes. Um diese Effekte zu untersuchen und mit Hilfe von Finite-Elemente-Rechnungen zu verifizieren bzw. zu korrigieren, wurden Bestahlungsmessungen von nominell 60 s, 90 s und 120 s Dauer in drei unterschiedlichen Messpositionen durchgeführt. Um den Einfluss von zufälligen Positionsänderungen der Quelle (Außendurchmesser: 1,1 mm) innerhalb der Edelstahlnadel auf das Endergebnis zu minimieren, mussten für jede Bestahlungsdauer und für jede Messposition ca. 100 Messungen mit dem Kalorimeter durchgeführt werden.

Mit dem hier vorgestellten Messverfahren konnte erstmals gezeigt werden, dass die Bestimmung der Wasser-Energiedosisleistung von ^{192}Ir -Brachytherapiequellen im klinisch relevantem Abstand mit Hilfe eines Wasserkalorimeters möglich ist. Die relative Standardmessunsicherheit des kalorimetrischen Verfahrens beträgt weniger als 1 %.

Internationaler Vergleich der Primärnormal-Messeinrichtungen zur Darstellung der Einheit der Wasser-Energiedosis von Beta-Brachytherapiequellen

Mit der Fertigstellung einer neuen Primärnormal-Messeinrichtung, der Multi-elektroden-Extrapolationskammer, ist die PTB seit 2005 in der Lage, eine räumlich aufgelöste 3D-Dosisverteilung im klinisch relevanten

Nahfeld von Beta-Brachytherapiequellen absolut darzustellen, ohne auf ein zusätzliches sekundäres Dosimetriesystem zurückgreifen zu müssen. 2006 wurde ein bilateraler Vergleich mit dem NIST im Nahfeld einer $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ -Linienquelle, die baugleich in der Gefäß-Strahlentherapie eingesetzt wird, erfolgreich durchgeführt. Im weiteren Bemühen, die Vergleichbarkeit der Primärnormal-Messeinrichtungen unter Beweis zu stellen, wurde 2008 ein internationaler Vergleich der Wasser-Energiedosis im Nahfeld einer ^{106}Ru -Flächenquelle durchgeführt. Quellen ähnlichen Typs finden in der Augentumor-Strahlentherapie Anwendung. Für den Vergleich wurde eine speziell angefertigte Flächenquelle in eine Halterung eingebaut und in einer wasseräquivalenten Tiefe von 1 mm jeweils in der PTB, beim NIST und beim niederländischen NMI vermessen.

In der PTB wurde die Quelle mit der neuen Primärnormal-Messeinrichtung, einer Multi-elektroden-Extrapolationskammer (MEK), vermessen. Diese Messeinrichtung basiert auf einer Extrapolationskammer mit einer segmentierten Sammelelektrode, die mit Hilfe lithographischer Verfahren im Reinraumzentrum der PTB auf einem Silicium-Wafer hergestellt wurde. Mit dieser neuartigen Sammelelektrode kann simultan an 28 Messpunkten mit einer Ortsauflösung von 1 mm x 1 mm gemessen werden. Beim NIST und beim NMI wurde die Wasser-Energiedosis im Dosismaximum ebenfalls mit einer Extrapolationskammer absolut bestimmt. Um eine bessere räumliche Auflösung zu erhalten, wurde am NIST zusätzlich eine zweidimensionale Dosisverteilung mit Radiochrom-Film

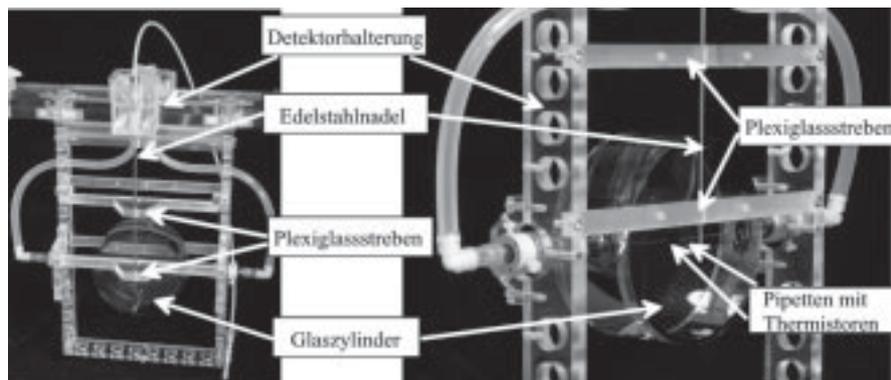


Bild 2: Detektorhalterung mit zusätzlichen Plexiglasstreben zur Fixierung der Edelstahlnadel vor bzw. hinter dem Glaszylinder des Detektors (links: 48 mm Abstand zu den Thermistoren; rechts: 24,35 mm Abstand). Die ^{192}Ir -Quelle wird mit Hilfe des Afterloaders bis in die Spitze der Nadel transportiert.

bestimmt (siehe Bild 3). Der Vergleich der Wasser-Energiedosisleistung im Dosismaximum bei einer Mittelung über eine Fläche von 4 mm Durchmesser ergab eine relative Differenz von 1 % zwischen PTB und NIST und 4 % zwischen PTB und NMi bei einer Mittelung über eine Fläche von 1 mm Durchmesser. Die relative Standard-Messunsicherheit der PTB und des NMi betrug hierbei 3 %, die des NIST lag bei 3,5 %.

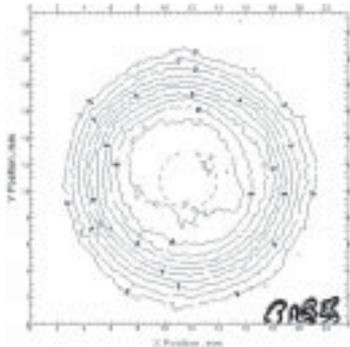


Bild 3: Isodosen der ^{90}Ru -Flächenquelle in 1 mm Wassertiefe. Die Messung wurde am NIST mit Radiochromic-Film durchgeführt (Intervalle der Isodosen: 5 mGy $^{-1}$).

PTB-Alanin-Dosimetriesystem für die Qualitätssicherung in Belgien

Eine seit längerem bestehende Zusammenarbeit zwischen der PTB und dem Ziekenhuis Middelheim, Antwerpen, Belgien, auf dem Gebiet der Alanindosimetrie wurde im letzten Herbst durch einen Kooperationsvertrag geregelt und erweitert. Als Partner hinzugekommen ist die Xios Hoogeschool in Limburg, Belgien. Ziel der Zusammenarbeit ist die Entwicklung von Dosismessverfahren für moderne Strahlentherapieformen wie die intensitätsmodulierte Strahlentherapie (IMRT) oder Tomotherapie mittels Alanin und Elektronen-Spin-Resonanz (ESR). Mittelfristig soll mit Hilfe dieser Technik ein System zur Qualitätssicherung in der Dosimetrie für diese Strahlentherapieformen in Belgien implementiert werden.

Untersuchungen der PTB zeigen, dass ein zur Zeit auf dem Markt erhältliches kompaktes Tischgerät (ESR-Spektrometer) noch zu hohe Unsicherheiten für die gestellten Anforderungen liefert. Daher wurden von belgischer Seite Mittel eingeworben, um ein adäquates Messsystem anschaffen zu können. Die Mittel werden zum Teil durch die Europäische

Union (Europees fonds voor regionale ontwikkeling – Limburg), zum Teil durch die Xios Hoogeschool bereitgestellt. Die Auswahl des Messgerätes und die Planung erfolgten in Zusammenarbeit mit der PTB, deren Messsystem voraussichtlich Ende 2008 im NuTec Zentrum (Dienstleistungszentrum für Strahlenschutz und Kerntechnik) der Xios Hoogeschool in Limburg mit Unterstützung der PTB dupliziert werden wird.

Exemplarstreuung der Energieabhängigkeit des Ansprechvermögens von Ionisationskammern

Entsprechend der Norm DIN 6800-2 wird das unterschiedliche Ansprechvermögen einer Ionisationskammer bei der Kalibrierung im ^{60}Co -Strahlungsfeld und bei der Messung im hochenergetischen Photonenstrahlungsfeld durch den Korrektionsfaktor k_Q korrigiert. Dieser Korrektionsfaktor hängt sowohl von der Strahlungsqualität der Photonenstrahlung als auch vom Aufbau und den Abmessungen der verwendeten Ionisationskammer ab.

Die in der Norm DIN 6800-2 angegebenen Werte des Korrektionsfaktors k_Q wurden zum größten Teil aus Modellrechnungen und Monte-Carlo-Simulationen abgeleitet, denen der nominelle Aufbau des jeweiligen Ionisationskammertyps zu Grunde gelegt wurde. Eventuelle exemplarspezifische Variationen (z. B. infolge von Fertigungstoleranzen) wurden dabei nicht berücksichtigt. Das Ziel der durchgeführten Untersuchungen bestand darin, die Schwankung der individuellen k_Q -Faktoren für einzelne Kammern der Typen PTW 30013 und PTW 31013 experimentell zu bestimmen.

Die PTB Braunschweig verfügt über mehrere Sekundärnormal-Ionisationskammern, für die individuelle k_Q -Werte durch direkten Vergleich mit dem Primärnormal für die Einheit der Wasser-Energiedosis bestimmt wurden. Unter Verwendung dieser Sekundärnormalkammern wurden die individuellen k_Q -Faktoren von jeweils 10 Ionisationskammern der Typen PTW 30013 und PTW 31013 in den 8 MV- und 16 MV-Photonenfeldern des Linearbeschleunigers der PTB Braunschweig bestimmt.

Dazu wurden zunächst alle Kammern im ^{60}Co -Referenzstrahlungsfeld der PTB kali-

briert. Anschließend wurden unter Referenzbedingungen in den hochenergetischen Photonenstrahlungsfeldern die Anzeigeverhältnisse der zu untersuchenden Kammer und mehrerer Sekundärnormal-Ionisationskammern bestimmt. Unter der Annahme, dass die mit der Sekundärnormal-Ionisationskammer und dem jeweiligen Prüfling in demselben Photonenstrahlungsfeld gemessene Dosisleistung gleich ist, wurde der Strahlungsqualitäts-Korrektionsfaktor k_Q des Prüflings ermittelt.

Die Tabelle (Bild 4) enthält eine summarische Zusammenfassung der experimentell erhaltenen k_Q -Werte; in Bild 5 sind die für jede einzelne Kammer erhaltenen k_Q -Werte bei beiden Photonenenergien dargestellt.

Die hier vorgestellten Untersuchungen zeigen, dass die exemplarspezifische Variation der k_Q -Werte – zumindest für die hier untersuchten Kammertypen PTW 30013 und PTW 31013 – höchstens etwa 0,3 % beträgt. Damit können experimentell bestimmte kammertypspezifische k_Q -Werte mit einer relativen Standard-Messunsicherheit von 0,28 % angegeben werden. Diese Messunsicherheit, in der bereits die exemplarspezifische Variation der k_Q -Werte berücksichtigt ist, ist deutlich geringer als die bislang in der Norm DIN 6800-2 verwendete Messunsicherheit von 1,0 %. Die durchgeführten Untersuchungen bieten daher Potential zur weiteren Verbesserung der in der Norm DIN 6800-2 enthaltenen Daten.

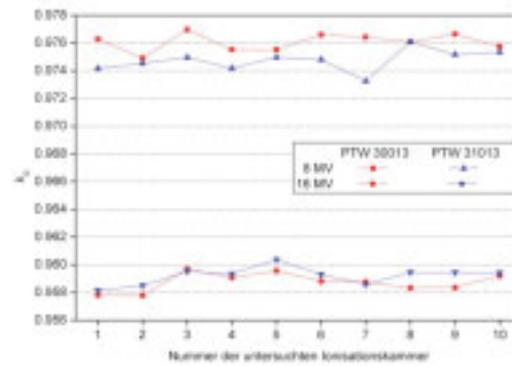


Bild 5: Experimentell bestimmte k_Q -Werte für die hier untersuchten Kammer der Typen PTW 30013 und PTW 31013 in den 8 MV- und 16 MV-Photonenstrahlungsfeldern des PTB-Linearanbeschleunigers.

Energieselektive Neutronen-Radiographie für die Inspektion von Gepäck und Frachtgut

Mit den heute überwiegend benutzten Verfahren für die Kontrolle von Gepäck und Frachtgut mit Röntgen- oder Gammastrahlung können Materialien aus leichten Elementen kaum unterschieden werden. Die sichere Bewertung der Bilder erfordert vom Bedienpersonal eine große Erfahrung. Dagegen ist die Radiographie mit schnellen Neutronen – Fast-Neutron Resonance Radiography (FNRR) – eine vielversprechende Methode für den vollautomatischen Nachweis und die Identifizierung von Waffen, Sprengstoff und anderen Gegenständen, die in Gepäckstücken oder Frachtgut versteckt wurden. Dabei wird ausgenutzt, dass die Wechselwirkung von Neutronen stark von deren Energie und der Elementzusammensetzung des untersuchten Transportguts abhängt. Dies ist in Bild 6 grafisch veranschaulicht, in dem berechnete Transmissionskoeffizienten für den Durchgang von Neutronen durch verschiedene Materialien gezeigt sind.

Kammertyp	PTW 30013		PTW 31013	
Nominelle Beschleunigungsspannung	8 MV	16 MV	8 MV	16 MV
Strahlungsqualitätsindex Q	0,716	0,762	0,716	0,762
Mittelwert aller individuellen k_Q -Werte	0,9761	0,9587	0,9748	0,9592
Relative Schwankungsbreite der individuellen k_Q -Werte (bezogen auf den jeweiligen Mittelwert)	0,21 %	0,20 %	0,29 %	0,23 %
Relative Standard-Messunsicherheit	0,28 %	0,28 %	0,28 %	0,28 %

Bild 4

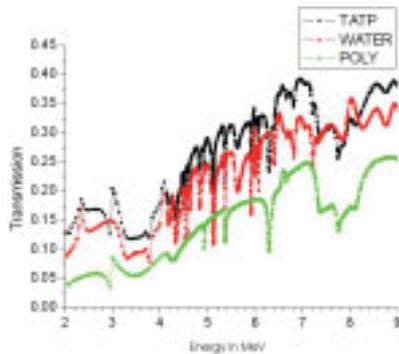


Bild 6: Berechnete Transmissions-Koeffizienten für Neutronen beim Durchgang durch 10 cm dicke Materialien. TATP: Tri-Aceton Tri-Peroxid (ein aus Haushalts-Chemikalien herstellbarer Sprengstoff); WATER: Wasser; POLY: Polyethylen

Zunächst wird bei der FNRR-Methode das Neutronenbild über einen Szintillations-Schirm in ein optisches Bild gewandelt, das mit Hilfe einer speziellen elektro-optischen Nachweiskette ein Transmissionsbild für eine wohldefinierte, wählbare Neutronenenergie liefert. Das schmale Energiefenster wird dabei über die Laufzeit der Neutronen aus einem breitbandigen gepulsten Neutronenstrahl definiert, mit dem der untersuchte Gegenstand bestrahlt wird. Aus einer Reihe von Bildern eines Gegenstandes, die bei verschiedenen Neutronenenergien aufgenommen wurden, kann dann ein materialspezifisches Abbild gewonnen werden. Sukzessive Messungen bei verschiedenen Neutronenenergien sind jedoch zeitraubend und ineffizient. Deshalb geht die aktuelle Detektorentwicklung zu Systemen, die gleichzeitig mehrere Bilder eines Gegenstandes aufnehmen können. Ein solches System mit vier Kanälen für verschiedene Neutronenenergien, das unter Beteiligung der PTB aufgebaut wurde, ist schematisch in Bild 7 gezeigt. Hier wurde die einkanalige Nachweiskette durch einen großflächigen optischen Vorverstärker (OPA) und vier Hochgeschwindigkeits-Verstärkerkameras ersetzt. Damit können gleichzeitig Bilder bei vier verschiedenen Neutronenenergien aufgenommen werden. Mit der nun verfügbaren kürzesten Belichtungszeit von 4 ns kann entweder die Energieauflösung gegenüber früheren Systemen verbessert oder die Laufzeit der Neutronen verkürzt und damit die Größe des Gerätes verkleinert werden.

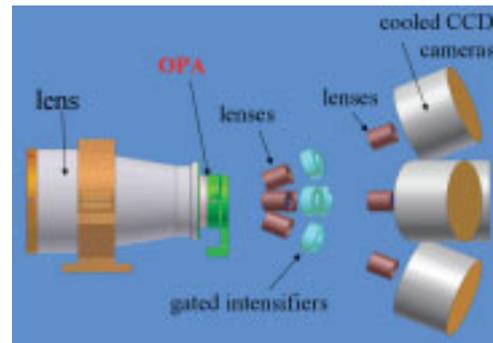


Bild 7: Schematische Darstellung eines Vierkanal-Detektorsystems für die energieselektive Neutronen-Radiographie mit optischem Vorverstärker (OPA) und unabhängig voneinander steuerbaren Hochgeschwindigkeits-Verstärkerkameras (ICCD).

Zur Skalierbarkeit von Spurstrukturen ionisierender Strahlung in nanometrischen Volumina

Eine grundlegende Aufgabe der experimentellen Nanodosimetrie ist die Untersuchung von Spurstrukturen ionisierender Strahlung in nanometrischen biologischen Volumina, wie z. B. in DNA-Segmenten, im Hinblick auf die Erzeugung von Strahlenschäden, die auf direkte Ionisationsereignisse zurückzuführen sind. Die wesentliche Kenngröße einer derartigen Spurstruktur ist die Häufigkeitsverteilung der Größe von Ionisationsclustern, das sog. nanometrische Spektrum. Ein Volumenelement, welches für diese Art von Untersuchung als geeignet angesehen werden kann, ist ein DNA-Segment, bestehend aus etwa 20 Basenpaaren, d. h. ein Zylinder mit einem Durchmesser von ca. 4 nm und einer Höhe von ca. 8 nm bei einer Dichte von 1 g/cm^3 . Nanometrische Spektren, die einem solchen Volumenelement zuzuordnen sind, können in einem ionenzählenden Nanodosimeter gemessen werden, das mit einem geeigneten Gas gefüllt ist und in dem die durch die ionisierende Strahlung erzeugten Ionen nach ihrer Drift durch das Gas nachgewiesen werden. Da als Ersatztarget für ein DNA-Segment ein Zylinder aus flüssigem Wasser dient, benötigt man ein Verfahren, um die in gasförmigen Medien gemessenen nanometrischen Spektren so umzuskalieren, dass sie äquivalent zu den nanometrischen Spektren eines Targets aus flüssigem Wasser mit nanometrischen Dimensionen sind. Ein solches Skalierungsverfahren beruht auf dem Verhältnis der mittleren freien Weglängen, die die ionisierenden Teilchen in dem jeweiligen

Ionisierende Strahlung

Medium haben. Die mittlere freie Weglänge eines Teilchens in einem Material ist wiederum umgekehrt proportional zum Wirkungsquerschnitt.

An den Beschleunigeranlagen der PTB wurden nanometrische Spektren in monoenergetischen Protonen- und Alphateilchenstrahlen im Energiebereich von 0,1 MeV bis 20 MeV gemessen. Als Messgase dienten C_3H_8 und N_2 . Die aus den Wirkungsquerschnitten von C_3H_8 und N_2 resultierenden mittleren freien Weglängen ergeben Druckverhältnisse von 0,55 mbar C_3H_8 und 1,2 mbar N_2 für Alphateilchen und 0,5 mbar C_3H_8 und 1,2 mbar N_2 für Protonen. Im Experiment wird die beste Übereinstimmung für Druckverhältnisse von 0,46 mbar C_3H_8 und 1,2 mbar N_2 für Alphateilchen und 0,425 mbar C_3H_8 und 1,2 mbar N_2 für Protonen erzielt. Der Grund für diesen Unterschied liegt in den großen Unsicherheiten der zur Zeit in der Literatur vorhandenen Wirkungsquerschnitte für Alphateilchen und Protonen in den verwendeten Gasen.

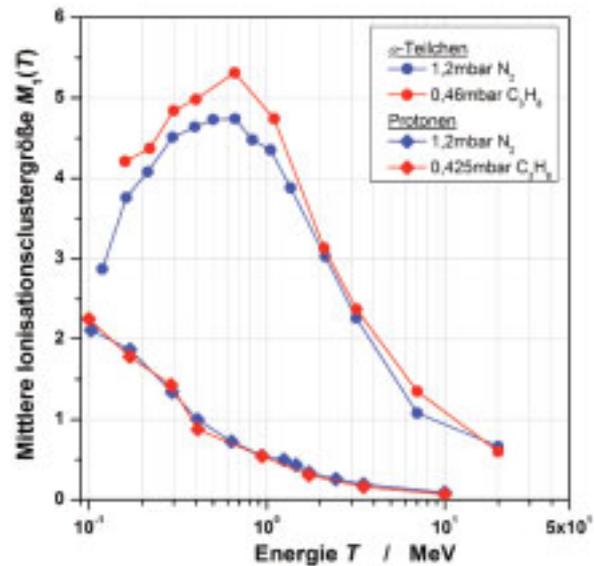


Bild 8: Vergleich der mittleren Ionisationsclustergröße $M_1(T)$ für die gemessenen Häufigkeitsverteilungen der Ionisationsclustergröße für primäre Protonen- und Alphateilchenstrahlen verschiedener Energien T für die jeweilige Kombination der beiden Messgase.

In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

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

Grundlagen der Metrologie

Bestimmung der Aktivität und der Photonenemissionswahrscheinlichkeiten von Antimon-124

Im Rahmen des internationalen EUROMET-Projektes 907 hat sich die Arbeitsgruppe „Aktivitätseinheit“ der PTB erfolgreich der Darstellung der Aktivitätseinheit von ^{124}Sb und der Bestimmung von 41 Photonenemissionswahrscheinlichkeiten gestellt. Dieses Projekt war gleichzeitig Anlass, neue Verfahren zu etablieren und bestehende zu modernisieren. (O. Ott, FB 6.1, oliver.ott@ptb.de)

Bestimmung der Halbwertszeit des primordialen Isotops Samarium-147

In Zusammenarbeit mit der Technischen Universität München hat die PTB die Halbwertszeit des für die Geochronologie wichtigen langlebigen Radionuklids ^{147}Sm bestimmt. Die Unsicherheit konnte im Vergleich zu früheren Messungen deutlich reduziert werden. (K. Kossert, FB 6.1, karsten.kossert@ptb.de)

Kalorimetrische Bestimmung der Wasser-Energiedosis im Nahfeld von Iridium-192-Brachytherapiequellen

Messgröße in der Dosimetrie von Brachytherapiequellen ist die Wasser-Energiedosisleistung, \dot{D}_w , in 1 cm Abstand vom Aktivitätsschwerpunkt des Strahlers senkrecht zur Quellenachse. Mit Hilfe eines Wasserkalorimeters lässt sich die gewünschte Messgröße direkt und mit geringer Standardmessunsicherheit bestimmen. Als erster Schritt wurde ein in der PTB existierendes Wasserkalorimeter für die Anwendung mit ^{192}Ir -Brachytherapiequellen so modifiziert, dass die Wasser-Energiedosisleistung im Nahfeld der Quelle in einem minimalen Abstand von 24,35 mm bestimmt werden konnte. Dabei wurde eine relative Standardmessunsicherheit kleiner als 1 % erreicht. (Achim Krauss, FB 6.2, achim.krauss@ptb.de)

Erste Messungen der Wasser-Energiedosis für die interstitielle Brachytherapie

Es wurde eine neue Extrapolationskammer aus einem wasseräquivalentem Material gebaut, mit deren Hilfe die Wasser-Energiedosis im Phantom in Abwesenheit eines Hohlraums bestimmt werden kann. Dabei werden die bei verschiedenen Plattenabständen erzeugten Ladungsmengen mittels Monte-Carlo-Rechnungen in die Wasser-Energiedosis umgerechnet. Die Bedingungen sind so gewählt, dass Elektronentransportphänome in den Monte-Carlo-Rechnungen nicht berücksichtigt werden müssen. (Th. Schneider, FB 6.2, thorsten.schneider@ptb.de)

Digitales Datenaufnahmesystem für die Spektrometrie mit Szintillationsdetektoren

Ein von der ENEA (Ente per le Nuove tecnologie, l'Energia e l'Ambiente, Frascati) entwickeltes digitales Datenaufnahmesystem wurde in Betrieb genommen und im Einsatz an den Neutronenreferenzfeldern der PTB-Beschleunigeranlage getestet. Im Vergleich zu dem bisher benutzten System sind jetzt spektrometrische Messungen praktisch ohne Qualitätsverluste bei bis zu einem Faktor 10 höheren Signalraten möglich. (A. Zimbal, FB 6.5, andreas.zimbal@ptb.de)

Initiative zur Verbesserung des Datensatzes für den Elektronentransport im Wasser

Die Unsicherheiten in der Berechnung der Ionisationscluster-Erzeugung durch niederenergetische Elektronen in einem für die Dosimetrie wichtigen Material sind sehr stark von der Qualität der Ionisationsquerschnitte abhängig. Um deren Einfluss zu bestimmen, wurde mit Hilfe zweier unterschiedlichen Monte-Carlo-Programme (das Monte-Carlo-Programm des Fachbereiches 6.6 und GEANT4-DNA) die Ionisationscluster-Erzeugung durch Elektronen in Wasser simuliert. Diese Arbeit wurde in Zusammenarbeit mit Marion Bug (Centre for Medical Radiation Physics, University of Wollongong) durchgeführt und ist der erste Schritt einer umfangreicheren Initiative, die eine Verbesserung des Datensatzes für den Elektronentransport im Wasser ermöglicht und diese Daten der wissenschaftlichen Gemeinschaft zur Verfügung stellen wird. (E. Gargioni, FB 6.6, elisabetta.gargioni@ptb.de)

Teilchenspur-Rekonstruktion wichtig für Messungen der Ionisationscluster von Primärelektronen mit Hilfe eines ionenzählenden Nanodosimeters

Im Rahmen einer Zusammenarbeit zwischen dem Fachbereich 6.6 und dem Loma Linda University Medical Center (LLUMC, San Bernardino, USA) wurde die Ionisationscluster-Verteilung für Primärelektronen mit Hilfe eines ionenzählenden Nanodosimeter gemessen und mit Monte-Carlo-Simulationen verglichen. Die Ergebnisse zeigen, dass wegen der im Vergleich zu Ionen sehr großen Streuung und breiten Winkelverteilung der Primärelektronen die Teilchenspur-Rekonstruktion eine wesentliche Rolle in der Datenanalyse spielt. Daher ist es wichtig, das ionenzählende Nanodosimeter mit einem geeignetem System für Teilchenspurstruktur-Nachweis und Triggerung der Elektronen aufzurüsten. (E. Gargioni, FB 6.6, elisabetta.gargioni@ptb.de)

Spektrometrie von Röntgenstrahlungsfeldern

Die Charakterisierung der im Fachbereich 6.6 realisierten Röntgenstrahlungsfelder beinhaltet die spektrometrische Bestimmung der Energieabhängigkeit der Photonenfluenz. Hierzu werden die Pulshöhenspektren der Strahlungsfelder mit einem HPGe-Detektor gemessen und entfaltet. Zusätzlich zu den gefilterten Spektren der verschiedenen Spektrenserien wurden ungefilterte Spektren für alle in den Spektrenserien vorkommenden Anodenspannungen aufgenommen. Diese ungefilterten Spektren erlauben durch nachträgliche numerische Filterung mit beliebigen Filtern die Erzeugung der verschiedensten Röntgenspektren. (W. Y. Baek, FB 6.6, woonyong.baek@ptb.de)

Doppelt differentielle inelastische Elektronenstreuquerschnitte von DNA-Bausteinen

Es ist allgemein bekannt, dass DNA das strahlensensitive Target innerhalb einer Zelle darstellt und die biologische Wirksamkeit ionisierender Strahlung nicht nur von der Energiedosis, sondern auch von deren Spurstruktur abhängt. Zur Berechnung solcher Spurstrukturen sind die Wechselwirkungsquerschnitte zwischen den DNA-Bausteinen und Elektronen, die meist in großer Menge als Sekundärteilchen beim Durchgang ionisierender Strahlung im Gewebe freigesetzt werden, unentbehrlich.

Angesichts dieser Tatsache wurden die doppelt differentielle inelastischen Elektronenstreuquerschnitte als Funktion des Streuwinkels und der Sekundärelektronenenergie von Tetrahydrofuran (C_4H_8O), welches eine nahezu identische Struktur wie Deoxyribose besitzt, experimentell bestimmt. (G. Hilgers, FB 6.6, gerhard.hilgers@ptb.de)

Experimentelle Überprüfung der Skalierbarkeit von Spurstrukturen ionisierender Strahlung in nanometrischen Volumina

Bei der Modellierung nanometrischer Spektren dient ein Zylinder aus flüssigem Wasser als Ersatztarget für ein DNA-Segment. Deshalb benötigt man ein Verfahren, um die in gasförmigen Medien gemessenen nanometrischen Spektren so umzuskalieren, dass sie äquivalent zu den nanometrischen Spektren eines Targets aus flüssigem Wasser mit nanometrischen Dimensionen sind. Ein solches Skalierungsverfahren beruht auf dem Verhältnis der mittleren freien Weglängen, die die ionisierende Teilchen in dem jeweiligen Medium haben.

An den Beschleunigeranlagen der PTB wurden nanometrische Spektren in monoenergetischen Protonen- und Alphateilchenstrahlen im Energiebereich von 0,1 MeV bis 20 MeV gemessen. Als Messgase dienten C_3H_8 und N_2 . (G. Hilgers, FB 6.6, gerhard.hilgers@ptb.de)

Bestimmung des Massen-Energieabsorptionskoeffizienten von Luft im harten Röntgenbereich

Aus den Ergebnissen mehrerer Vergleichsmessungen der Freiluft-Ionisationskammer PK100 mit dem in der Arbeitsgruppe 7.13 *Röntgenradiometrie* für den harten Röntgenbereich weiterentwickelten Kryoradiometer SYRES I wurde der Massen-Energieabsorptionskoeffizient von Luft für Photonen mit Energien zwischen 10 keV und 90 keV experimentell ermittelt. (H. Rabus, FB 6.6, hans.rabus@ptb.de)

Vergleich der ionometrischen und kalorimetrischen Bestimmung der Wasser-Energiedosis bei Co-60-Gammastrahlung

Kalorimetrie und Ionometrie sind zwei komplementäre Methoden zur Darstellung der Einheit der Wasser-Energiedosis bei Co-60-Gammastrahlung. Ein Vergleich beider Methoden ergab einen signifikanten Unterschied von $1,4 \% \pm 0,4 \%$. Wahrscheinlichste Ursache dafür sind die Literaturwerte für das Bremsvermögen von Elektronen in Grafit, die bei der Umrechnung des gemessenen Ionisationsstromes der Grafit-Hohlraum-Ionisationskammer in die Wasser-Energiedosisleistung verwendet werden. (L. Büermann, FB 6.6, ludwig.bueermann@ptb.de)

Metrologie für die Wirtschaft

Klein, schwarz, schnell: PTB präsentiert autarken Datenlogger im Taschenformat

Ob ionisierende Strahlung, Umdrehungen, Durchflussmengen – alles, was sich in Impulsen ausdrückt, kann er zählen, und zwar schnell: der neu entwickelte Datenlogger der PTB. Dabei passt er mit seinen 9 cm x 6 cm x 2 cm in jede Hosentasche. An den kleinen Kasten können vier Geräte gleichzeitig angeschlossen werden und die vier schnellen unabhängigen Zähler können bis zu 100 Millionen Impulse pro Sekunde (100 MHz) erfassen. Der Datenlogger speichert seine Messergebnisse auf eine handelsübliche SD-Speicherkarte und hebt dadurch die bisherige Begrenzung interner Speicher auf. Er eignet sich besonders für Langzeitmonitoring an Orten, die – aufgrund von Gefahren für die menschliche Gesundheit – schwer zugänglich sind. Gleichzeitig ist er in der Lage, Messwerte auf seinem brillanten OLED-Bildschirm grafisch darzustellen. (F. Langner, FB 6.4, frank.langner@ptb.de)

Messung von Wirkungsquerschnitten für die Streuung von Neutronen an Blei, Bismut und Tantal im Energiebereich von 2 MeV bis 4 MeV

Messungen von Neutronen-Streuquerschnitten für Blei, Bismut und Tantal im Energiebereich von 2 MeV bis 4 MeV wurden am Flugzeitspektrometer der PTB durchgeführt. Die $^{15}N(p,n)$ -Reaktion wurde als Quelle für monoenergetische Neutronen eingesetzt. Differentielle und winkelintegrierte Wirkungsquerschnitte für die elastische und inelastische Streuung konnten mit großer Präzision bestimmt und mit anderen Daten verglichen werden. Oberhalb von 3 MeV zeigen sich dabei signifikante Abweichungen zu den aus Photoemissionswirkungsquerschnitten berechneten inelastischen Streuquerschnitten für die niedrigsten Anregungszustände. (E. Pönitz, FB 6.4, erik.poenitz@ptb.de)

Metrologie für die Gesellschaft

Thoron-Folgeproduktkammer nimmt den Kalibrierbetrieb auf

Im Rahmen eines zweijährigen Drittmittelprojektes wurde die Thoron-Folgeproduktkammer fertig instrumentiert und steht jetzt zur Darstellung der Einheit Bq/m^3 von $^{220,222}\text{Rn}$ und $^{220,222}\text{Rn}$ -Folgeprodukten zur Verfügung. (A. Röttger, FB 6.1, annette.roettger@ptb.de)

Moderne Methoden zur Bestimmung von Strontium-89 und Strontium-90 bei der Umweltüberwachung veröffentlicht

Die Radionuklide Sr-89 ($T_{1/2} = 50,5 \text{ d}$) und Sr-90 ($T_{1/2} = 28,4 \text{ a}$) werden bei der Kernspaltung mit relativ hoher Spaltausbeute erzeugt. Nach einer Freisetzung können sie in die Umwelt und auf Grund der chemischen Ähnlichkeit des Strontiums mit dem Calcium in die menschliche Nahrungskette gelangen und in den Knochen eingelagert werden. Daher ist Sr-90 mit seiner effektiven Halbwertszeit von 17,5 Jahren besonders für Kinder dosisrelevant. Da die Dosiskoeffizienten der Nuklide unterschiedlich sind, ist für eine Abschätzung einer Strahlenexposition des Menschen eine genaue Unterscheidung zwischen den Aktivitätskonzentrationen von Sr-89 und Sr-90 erforderlich. (H. Wershofen, FB 6.1, herbert.wershofen@ptb.de)

Machbarkeitsstudie für Low-Level-Radon-Referenzkammer abgeschlossen

Da die Radon-Messtechnik zur Zeit verstärkt an gesellschaftlicher Bedeutung (Gesundheitsvorsorge, Energiesparmaßnahmen und radiologische Sicherheitstechnik) gewinnt, ist der Aufbau einer Low-Level-Radon-Referenzkammer (LL-RRK) im Rahmen einer Machbarkeitsstudie geprüft worden. Nach den vorliegenden Ergebnissen ist die Darstellung der Einheit mit einer Unsicherheit von 5 % ($k = 2$) für diesen Aktivitätsbereich möglich. (A. Röttger, FB 6.1, annette.roettger@ptb.de)

Richard-Glocker-Bau eingeweiht

Mit drei neuen Elektronenbeschleunigern erweitert die PTB ihre Messmöglichkeiten für die Dosimetrie in der Strahlentherapie. Am 11. Juli 2008 haben Prof. Ernst O. Göbel und Staatssekretär Jochen Homann aus dem Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie den Richard-Glocker-Bau, der die Beschleuniger beherbergt, auf dem Braunschweiger PTB-Gelände offiziell eingeweiht. Zu den Kernaufgaben der Anlage zählen das Bereitstellen von Normalen der Einheit Gray für die Wasser-Energiedosis sowie das Prüfen, Verbessern und Entwickeln von Dosimetern und Dosismessverfahren für die klinische Praxis. Schwerpunkt der dosimetrischen Grundlagenforschung bildet die Untersuchung der Wechselwirkung von Strahlung mit diversen Materialien, biologische Systeme eingeschlossen. (K. Derikum, FB 6.2, klaus.derikum@ptb.de)

Exemplarstreuung der Energieabhängigkeit des Ansprechvermögens von Ionisationskammern

Für je 10 Ionisationskammern der Typen PTW 30013 und PTW 31013 wurden individuelle Ansprechvermögen in den hochenergetischen Photonenstrahlungsfeldern des Linearbeschleunigers der PTB relativ zum Ansprechvermögen im ^{60}Co -Strahlungsfeld bestimmt. Die Variation der erhaltenen k_Q -Faktoren aller Kammern beträgt weniger als 0,3 % (bezogen auf den Mittelwert aller k_Q -Faktoren). Die durchgeführten Untersuchungen bieten Potential zur weiteren Verbesserung der in der Norm DIN 6800-2 enthaltenen Daten. (R.-P. Kapsch, FB 6.2, ralf-peter.kapsch@ptb.de)

Bestimmung der radialen Anisotropie des Strahlungsfeldes von Iridium-192- und Cobalt-60-Brachytherapiequellen

^{192}Ir - und ^{60}Co -Brachytherapiequellen zeigen trotz ihres rotationssymmetrischen Aufbaus eine teilweise nicht zu vernachlässigende radiale Anisotropie ihres Strahlungsfeldes senkrecht zur zentralen Achse der Quellen. Seit Beginn des Jahres 2008 wird diese Anisotropie bei Kalibrierungen der Quellen mitbestimmt und im Kalibrierschein aufgeführt. (H.-J. Selbach, FB 6.2, hans-joachim.selbach@ptb.de)

PTB-Alanin-Dosimetriesystem für die Qualitätssicherung in Belgien

Eine Kopie des PTB-Messsystems für die Dosimetrie mittels Alanin und Elektronenspinresonanz wird gegen Ende 2008 an der belgischen Xios Hoogeschool Limburg im Rahmen einer Zusammenarbeit installiert werden. Mit dem Verfahren soll ein Qualitätssicherungssystem für die Dosimetrie für moderne Strahlentherapieformen wie IMRT für Belgien implementiert werden. (M. Anton, FB 6.2, mathias.anton@ptb.de)

NAVIDOS seit dem 15.08.2008 in einem Airbus A340 der Lufthansa im Messbetrieb

Nach einer ausführlichen Erprobungsphase wurde das von der PTB und der Christian-Albrechts-Universität Kiel entwickelte Dosimetriesystem NAVIDOS im August 2008 von Lufthansa Technik in einen Airbus A340-300 der Lufthansa eingebaut und ist am 15. August 2008 in Betrieb gegangen. Ziel der Messungen sind die Untersuchungen der Einflüsse wie zum Beispiel der Sonnenaktivität oder der Veränderung des Erdmagnetfeldes auf die Ortsdosisleistung in Flughöhen. Darüber hinaus dienen die Messungen auch zur Qualitätssicherung der Dosisermittlung für das fliegende Personal. (F. Wissmann, FB 6.4, frank.wissmann@ptb.de)

Neutronenmonitor für gepulste Strahlung

In der PTB wurde ein neuer Monitor zur Messung gepulster Neutronenstrahlung basierend auf dem Nachweis von β -Strahlung aus Aktivierungsreaktionen am Silber entwickelt. Die Entwicklung wurde von der PTB zum Patent angemeldet. (M. Luszik-Bhadra, FB 6.5, marlies.luszik-bhadra@ptb.de)

Energieselektive Neutronenradiographie für die Inspektion von Gepäck und Frachtgut

Schnelle Neutronen haben die Fähigkeit, größere Objekte zu durchdringen und dabei Informationen über die chemische Zusammensetzung der Probe zu liefern. Innerhalb eines binationalen Projektes mit dem NRC Soreq/Israel wurde ein hochauflösendes Neutronenradiographiesystem entwickelt, mit dem Schmuggelware und Sprengstoff in Gepäck und Luftfrachtcontainern aufgespürt werden kann. (V. Dangendorf, FB 6.5, volker.dangendorf@ptb.de)

Bayes'sche Analyse spektrometrischer Messungen in hochenergetischen Neutronenfeldern

Die Messunsicherheit eines erweiterten Bonnerkugel-Spektrometers bei Anwendungen in hochenergetischen Neutronenfeldern wurde mit Bayes'schen Verfahren analysiert. Es wurde gezeigt, dass das Spektrum unterhalb von etwa 1 MeV gut bestimmt werden kann, während die Information aus den Messergebnissen nicht ausreicht, um den Hochenergie-Bereich des Spektrums mit geringer Unsicherheit zu bestimmen. (M. Reginatto, FB 6.5, marcel.reginatto@ptb.de)

Internationale Angelegenheiten

VERMI-Workshop zum Thema „Quellenpräparation in der Radionuklidmetrologie“

Im Rahmen des Virtual European Radionuclide Metrology Institute (VERMI) wurde in der PTB ein Workshop zum Thema „Quellenpräparation in der Radionuklidmetrologie“ veranstaltet. Die Teilnehmer vom NPL, LNE-LNHB, IRMM und PTB hatten dabei die Gelegenheit, Erfahrungen in Theorie und Praxis auszutauschen. (K. Kossert, FB 6.1, karsten.kossert@ptb.de)

Die PTB war Gastgeberin der fünften internationalen ICRM-LLRMT-Konferenz

Vom 22. bis 26. September war die PTB Gastgeberin für die *5th International Conference on Radionuclide Metrology Low-Level Radioactivity Measurement Techniques*. Im Fokus der Konferenz standen Mess-, Analyse- und Kalibrierverfahren für die genaue Bestimmung kleinster Mengen an Radionukliden sowie nationale und internationale Vergleichsmessungen zur Verbesserung der Qualität von Radioaktivitätsmessungen. (D. Arnold, FB 6.1, dirk.arnold@ptb.de)

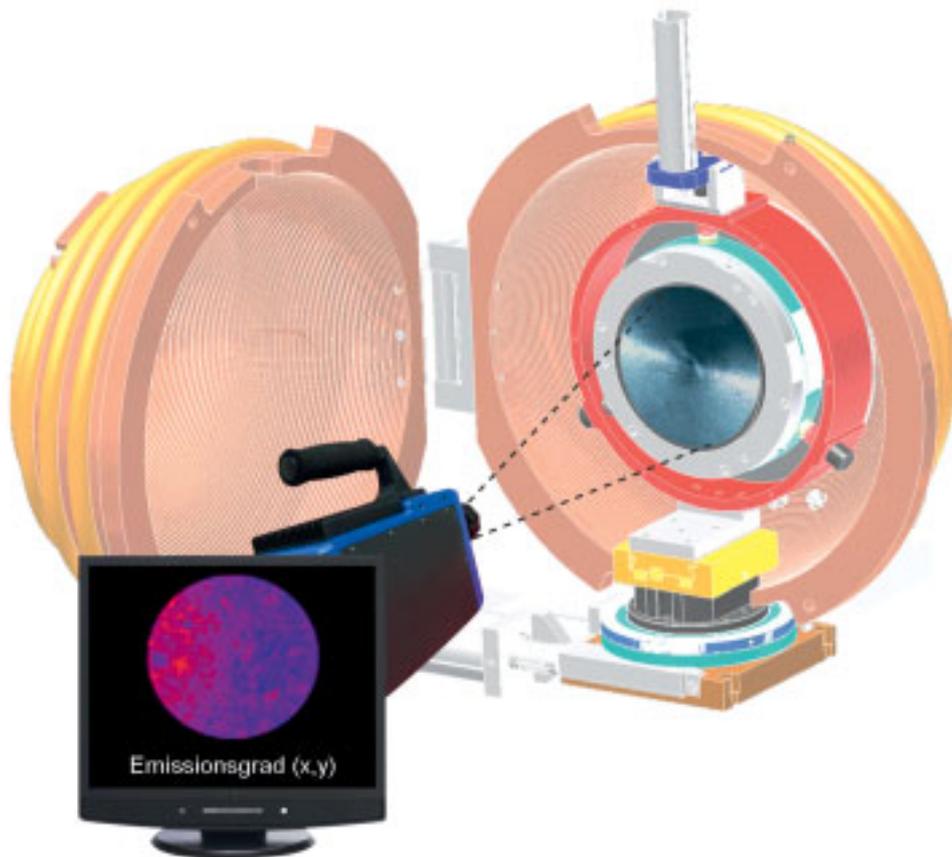
Bestimmung der Aktivität von Cer-139 und Yttrium-88 im Rahmen internationaler Vergleichsmessungen

Die Arbeitsgruppe Aktivitätseinheit hat zu Vergleichszwecken radioaktive Lösungen der Nuklide ^{139}Ce und ^{88}Y an das internationale Referenzsystem SIR beim BIPM geschickt und ist damit den Verpflichtungen aus dem Mutual Recognition Arrangement (MRA) nachgekommen. Gleichzeitig sind diese beiden Nuklide für den Test und die Weiterentwicklung von Rechenmodellen im Bereich der Flüssigszintillationszählung nach der CIEMAT/NIST- und TDCR-Methode wichtig und stützen die Neu- und Weiterentwicklung dieser Messmethoden in der PTB. (O. Nähle, FB 6.1, ole.j.naehle@ptb.de)

Internationaler Vergleich der Primärnormal-Messeinrichtungen zur Darstellung der Einheit der Wasser-Energiedosis von Beta-Brachytherapiequellen.

Zusammen mit dem National Institute of Standards and Technology (NIST) und dem Nederlands Meetinstituut (NMI) wurden die Primärnormal-Messeinrichtungen zur Darstellung der Einheit der Wasser-Energiedosis von Beta-Brachytherapiequellen verglichen. Gegenstand des Vergleichs war die Bestimmung der Wasser-Energiedosis im Nahfeld einer ^{106}Ru -Flächenquelle. Quellen ähnlichen Typs finden in der Augentumor-Strahlentherapie Anwendung. Der Vergleich ergab eine Übereinstimmung der Ergebnisse im Rahmen der Unsicherheiten. (M. Bambynek, FB 6.2, markus.bambynek@ptb.de)

Temperatur und Synchrotron- strahlung



Berichte der Abteilungen

Abteilung

7

Temperatur Synchrotron

Institut Berlin

Konnte 2007 noch über die wachsende öffentliche Wahrnehmung der PTB in der Berliner politischen und wissenschaftlichen Landschaft berichtet werden, so wurde 2008 bereits die Eröffnungsfeier für die Lange Nacht der Wissenschaften am 14. Juni – die achte Veranstaltung dieser Art mit knapp 200 000 Besuchern in Berlin und Potsdam insgesamt – im Berliner Institut der PTB ausgerichtet. Was daraus geworden ist, kann unter den Nachrichten des Jahres in diesem Bericht nachgelesen werden: eine erfolgreiche Präsentation einer Auswahl von Aktivitäten der Kollegen aus den beiden Berliner Abteilungen unter dem Motto „Magnetfelder sind überall“ mit viel Prominenz aus Wissenschaft und Politik und einem Besucherrekord im Hermann-von-Helmholtz-Bau (Bild 1).

Davor, am 26. Februar, hat die Deutsche Physikalische Gesellschaft, die 2008 wieder ihre Jahrestagung in Berlin abgehalten hat, in festlichem Rahmen ihre Wissenschaftspreise

im Hörsaal des Hermann-von-Helmholtz-Baus der PTB verliehen und anschließend mit den Preisträgern auf der Galerie gefeiert. Dadurch hat die weltweit größte Fachvereinigung von Physikern zum wiederholten Male ihre Verbundenheit mit der PTB zum Ausdruck gebracht. Ihr Regionalverband, die Physikalische Gesellschaft zu Berlin, hat am 20. Juni am selben Ort die 50. Verleihung ihres wissenschaftlichen Hauptpreises, des Karl-Scheel-Preises, mit vielen Gästen aus der Berliner Physik feierlich begangen. Karl Scheel (1866 – 1936) war langjähriger Mitarbeiter der PTR zu Beginn des 20. Jahrhunderts und dazu viele Jahre Herausgeber des Handbuchs der Physik und des Physikalischen Handwörterbuchs sowie Redakteur der Zeitschrift für Physik. Der diesjährige Preisträger, Dr. Norbert Koch von der Humboldt-Universität, berichtete über seine ausgezeichneten Arbeiten über konjugierte organische Materialien und deren funktionalen Grenzflächen. Den Festvortrag hielt Prof. Dr. Thomas Elsässer vom Max-Born-Institut in Berlin-Adlershof über das Thema „Ultra-

Titelbild:

Thermophysikalische Materialeigenschaften: Neuer Abteilungsschwerpunkt ist der Ausbau der Emissionsgradmessungen für Temperaturen oberhalb 1000 °C insbesondere auch mit bildgebenden radiometrischen Methoden. Das Titelbild zeigt eine aktuelle Messung der lateralen Verteilung des Emissionsgrades einer Probe mit einer Thermographiekamera bei 120 °C.



Bild 1: Besucher der Langen Nacht der Wissenschaften aus Wissenschaft und Politik – ganz rechts Prof. Dr. Jürgen Zöllner, Berliner Senator für Bildung, Wissenschaft und Forschung

r und nstrahlung

schnelle Strukturveränderungen und Schwingungsdynamik in Wasser“ mit aktuellem Bezug zu frühen Arbeiten von Karl Scheel. Dr. Reinhard Nink ließ Leben und Werk von Karl Scheel Revue passieren und die 50-jährige Geschichte des Preises im wahrsten Sinne des Wortes lebendig werden (Bild 2).



Bild 2: 50 Jahre Karl-Scheel-Preis: Dr. Reinhard Nink schildert das Leben des Stifters und die Geschichte des Preises.

Unter dem diesjährigen Motto „Quantensprünge“ veranstalteten das Bundesministerium für Bildung und Forschung, die Deutsche Physikalische Gesellschaft, die Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg und das Leibniz-Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung Dresden vom 14. bis 18. September 2008 in Halle das inzwischen traditionsreiche Wissenschaftsfestival „Highlights der Physik“. Zentraler Veranstaltungsort war der Hallenser Marktplatz, auf dem die Veranstalter ein Zelt mit einer interaktiven Ausstellung aufgebaut hatten. 30 Exponate waren den

Grundlagen und Anwendungen der Quantenphysik gewidmet, und auch die PTB war mit ihren SQUID-Sensoren und deren Anwendungen in Medizintechnik und Astronomie unter dem Titel „Kalte Spürnasen für kleinste Magnetfelder“ vertreten. Der erhebliche Aufwand hat sich angesichts der 30 000 Besucher und deren großem Interesse wirklich gelohnt (Bild 3).



Bild 3: Die kleinen Forscher auf dem PTB-Stand bei den „Highlights der Physik 2008“ in Halle.

Es scheint fast schon Tradition zu werden, dass die PTB sich einmal im Jahr mit ihrer eigenen Geschichte auseinandersetzt. Wurde 2006 des dritten Präsidenten Emil Warburg gedacht und 2007 das 120-jährige Gründungsjubiläum begangen, so wurde am 28. November 2008 vor zahlreichem Publikum ein neues Buch über die Bedeutung der wissenschaftlichen Beiträge der PTR zur modernen Physik der Öffentlichkeit vorgestellt (Bild 4). Das Buch von Prof. Dr. Rudolf Huebener und Dr.

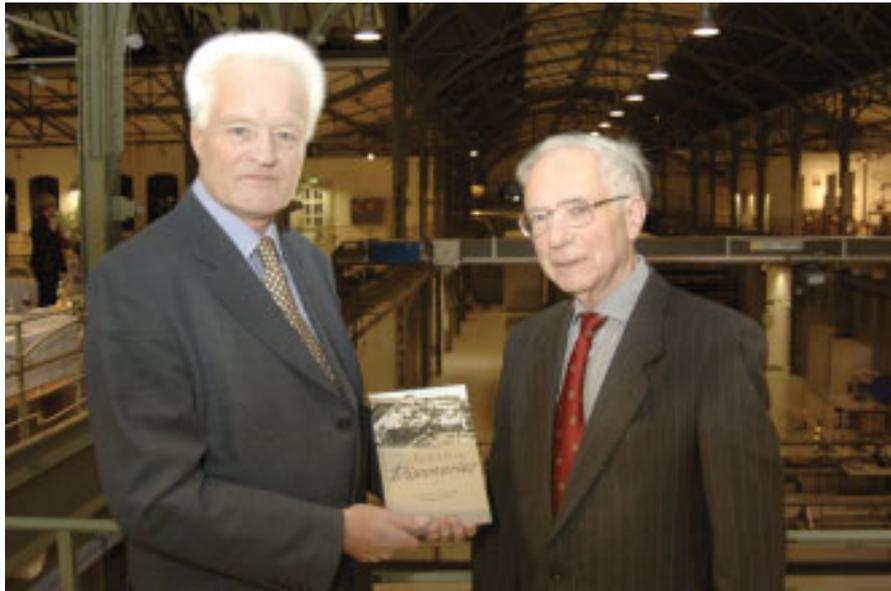


Bild 4: Die Autoren Prof. Dr. Rudolf Huebener und Dr. Heinz Lübbig präsentieren ihr Buch.

Heinz Lübbig mit dem Titel „A Focus of Discoveries“ wurde von Prof. Dr. Eberhard Jaeschke von der BESSY GmbH in seiner Rezension wärmstens empfohlen. Den Rahmen für diese Buchvorstellung gab ein Festvortrag von Prof. Dr. Dieter Hoffmann vom Max-Planck-Institut für Wissenschaftsgeschichte zum Thema „Max Planck und die PTR“.

Aus dem Bereich der Politik hatte das Institut Berlin am 6. August in Staatssekretärin Almuth Nehring-Venus von der Berliner Senatsverwaltung für Wirtschaft, Technologie und Frauen eine sichtlich neugierige und interessierte Besucherin, die u. a. auch als Mitglied des Kuratoriums der PTB insgesamt ihre volle Unterstützung zusagte – im besonderen auch ihrem Hauptstadtstandort.

Abteilung 7 Temperatur und Synchrotronstrahlung

Die PTB verändert ihr Aufgabenspektrum kontinuierlich, angepasst an die sich verändernden Anforderungen aus Wirtschaft, Gesellschaft und Wissenschaft. Das gilt entsprechend auch für die einzelnen Abteilungen. So gibt es zum einen Abteilungsthemen, die zu den Grundaufgaben der PTB gehören, wie Radiometrie – klassisch und mit Synchrotronstrahlung –, Thermometrie oder Durchflussmessungen. Sie werden auf hohem

Niveau weiterentwickelt. Aber es gibt zum anderen auch Themen, die wie die Terahertz-Metrologie im Jahre 2007 oder aktuell die Thermophysikalischen Eigenschaften (siehe Titelbild) verstärkt in den Vordergrund rücken – das Letztere aufgrund neuer Entwicklungen bei der Energieerzeugung und deren effizienter Nutzung. Hierfür müssen dann neue personelle und apparative Ressourcen aktiviert und Kooperationen mit anderen Abteilungen und der Industrie koordiniert werden.

Thermophysikalische Eigenschaften

Im Bereich ultratiefer Temperaturen arbeitet die Abteilung 7 seit Jahrzehnten, meist in enger Kooperation mit dem Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie (früher Hahn-Meitner-Institut), an der präzisen Bestimmung der spezifischen Wärme und der Wärmeleitfähigkeit von physikalisch und technisch interessanten Materialien für den



Bild 5: Apparatur zur Bestimmung des Emissionsgrades unter Atmosphäre bei Temperaturen bis 450 °C.

Tieftemperaturbereich. Bereits seit einigen Jahren erfreut sich die Präzisionsmessung des Emissionsgrads, einer weiteren thermophysikalischen Materialeigenschaft, im Bereich bis zu einigen hundert Grad eines stets steigenden Kundeninteresses (Bild 5). Solche Messungen sind nicht nur für Kunden u. a. aus der Automobilindustrie oder für genaue Energiebilanzrechnungen wichtig. Die Kenntnis des Emissionsgrads einer Oberfläche ist ebenso unverzichtbar für eine präzise strahlungsthermometrische Bestimmung ihrer Temperatur und damit für die Qualität der Strahlungsthermometrie. Der noch höhere Temperaturbereich bis 2000 °C hat nunmehr große Aufmerksamkeit erlangt, weil bewegte oder unzugängliche Teile, z. B. Turbinenschaufeln oder die innerste Wand der Plasmakammer eines Fusionsreaktors, besser strahlungsthermometrisch kontrolliert werden können als mit Berührungsthermometern. Für solche Messungen, bei denen auch die Wärmeleitfähigkeit und die spezifische Wärme eine große Rolle spielen, hat die Abteilung zum Ende des Jahres eine modifizierte Laser-Flash-Apparatur erhalten. Abteilungsübergreifend sind die Kollegen aus den Abteilungen *Mechanik und Akustik* und *Chemische Physik und Explosionsschutz* eingebunden.

Terahertz-Metrologie

Im Jahre 2007 wurden die Aktivitäten der PTB in Abteilung 2 und Abteilung 7 auf dem Gebiet der Terahertz-Metrologie gebündelt, unter großer Anerkennung durch den Wissenschaftsrat.

Bild 6: Schema für den Einsatz eines Kryoradiometers für die Terahertz-Radiometrie.

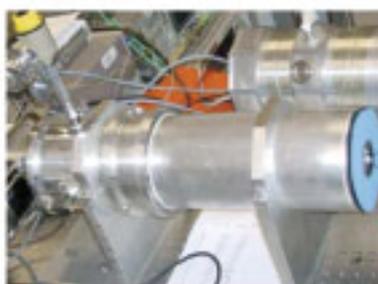
Nachdem im letzten Jahr bereits erste Ergebnisse mit einem berechenbaren Hohlraumstrahler für Terahertz-Strahlung vorgestellt werden konnten, haben im vergangenen Jahr erste detektorgestützte Messungen zum Erfolg geführt, bei denen in Kooperation mit dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrttechnik (DLR) in Berlin-Adlershof erstmals ein kommerzieller Detektor mit einem absolut messenden Kryoradiometer mit geringer Unsicherheit verglichen wurde (Bild 6). Dabei ergab sich auch eine gute Übereinstimmung mit den quellengestützten Messungen am Hohlraumstrahler – ein erstes Highlight in der Terahertz-Radiometrie.

Wie geplant hat mit der Metrology Light Source im Willy-Wien-Laboratorium der PTB in Berlin-Adlershof (s. u.) eine weitere Terahertz-Quelle ihren Nutzerbetrieb aufgenommen. Ein Infrarot-Strahlrohr (Bild 7), an dem auch Terahertz-Strahlung zur Verfügung steht, kann bereits genutzt werden. Ein deziertes Terahertz-Strahlrohr wird im kommenden Jahr fertig gestellt.



Bild 7: Infrarot-Strahlrohr an der Metrology Light Source.

Quantenkaskadenlaser



Linse

THz-Detektor



Kryoradiometer

Metrologie mit Synchrotronstrahlung

Dass die PTB ihrem metrologischen Engagement im Bereich der Synchrotronstrahlung auch künftig höchste Bedeutung beimisst, hat sie durch die Einrichtung eines weiteren Fachbereichs für dieses Arbeitsgebiet deutlich gemacht. Dahinter steht die klare Entscheidung, als metrologisches Staatsinstitut bei der Nutzung der Synchrotronstrahlung in Europa und auch weltweit die führende Stellung zu behaupten. Dieses Ziel einer „weltweiten Spitzenstellung“ und die „wegweisende Entscheidung“ für die Metrology Light Source (MLS), den PTB-eigenen Niederenergie-Speicherring in Berlin-Adlershof, wurden vom Wissenschaftsrat in seiner im Mai veröffentlichten Stellungnahme zur Evaluation der PTB ausdrücklich positiv bewertet.

Feierlich wurde am 23. Juni die MLS in Betrieb genommen (Bild 8), nachdem der Nutzerbetrieb förmlich bereits am 1. April aufgenommen worden war. Neben den Grußworten von Staatssekretär Jochen Homann aus dem Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie und von Staatssekretär Dr. Hans-Gerhard Husung von der Berliner Senatsverwaltung für Bildung, Wissenschaft und Forschung sprachen Prof. Dr. Eberhard Jaeschke von der BESSY GmbH über die forschungspolitische Bedeutung dieser neuen Strahlungsquelle, die von Mitarbeitern seines Hauses konzipiert und gebaut wurde und auch künftig betrieben wird, und Dr. Gerhard Ulm, Leiter des zuständigen PTB-Fachbereichs, über die dort zu bearbeitenden PTB-Aufgaben. Dr. Dieter Kurz, Vorstandsvorsit-

zender der Carl Zeiss AG – ein bedeutender und langjähriger Industriepartner der PTB, wies auf die harte Konkurrenz bei der Entwicklung der nächsten Chip-Generationen hin und zeigte die Bedeutung der EUV-Strahlung für die dafür benötigte Lithographie auf, für deren Erzeugung und Anwendung die MLS optimiert ist. Dr. Heinz-Wilhelm Hübers vom DLR erläuterte die zunehmende Anwendung von Terahertz-Strahlung in der Sicherheits- und Werkstoffprüftechnik und den dafür von der MLS zu erwartenden Beitrag. Nebenbei erinnerte er an die gute Tradition von Terahertz-Metrologie in der PTB. Es waren die berühmten Messungen der Spektren von Hohlraumstrahlern in der PTR in den letzten Jahren des 19. Jahrhunderts, die zur Planckschen Strahlungsformel geführt haben, und zwar insbesondere bei großen Wellenlängen, d. h. genau im Terahertz-Bereich.

Neben den fortgesetzten Aufbauarbeiten an den neuen Strahlrohren der MLS konnten bereits erste Kundenkalibrierungen und Messungen im Rahmen von Kooperationen am Strahlrohr für Detektorkalibrierung und Reflektometrie im UV- und VUV-Spektralbereich durchgeführt werden. Außerdem wurden die Speicherringparameter der MLS im gesamten Energiebereich von 105 MeV bis 630 MeV mit hoher Genauigkeit bestimmt, so dass die Strahlstärke der MLS am Weißlichtstrahlrohr nach der Schwinger-Theorie nunmehr berechenbar ist und die MLS als primäres Strahlungsnormal zur Verfügung steht.



Bild 8: Die feierlichen Inbetriebnahme der MLS; in der ersten Reihe von links: Prof. Dr. Joachim Treusch, Vorsitzender des BESSY-Aufsichtsrats; Dr. Dieter Kurz, Vorstandsvorsitzender der Carl Zeiss AG; Prof. Ernst O. Göbel.



Bild 9: Unterzeichnung der Vereinbarung über die künftigen Gebühren für die Nutzung von BESSY II: Prof. Jaeschke (BESSY GmbH) und Prof. Göbel

Für die weitere Nutzung von BESSY II durch die PTB nach dem Übergang des Speicherrings in das Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie konnte eine weitreichende Vereinbarung über die künftige Gebührenregelung gefunden werden, die sich an der Regelung für die Max-Planck-Gesellschaft orientiert. Sie wurde am 19. August unterzeichnet (Bild 9).

Die Vergleichbarkeit der spektralen Empfindlichkeit im Spektralbereich des EUV wurde weltweit erstmalig im Rahmen des Comité Consultatif de Photométrie et Radiométrie durch einen internationalen Vergleich zwischen dem amerikanischen und dem japanischen Staatsinstitut und der PTB unter deutscher Leitung bestätigt.

Nano-Metrologie

Auf Grund der verfügbaren Wellenlängen der Synchrotronstrahlung des Speicherrings BESSY II ist diese Strahlung das ideale Werkzeug für die optische Nano-Metrologie. Eine der Aufgaben ist die Bestimmung der Größe von Nanopartikeln und deren Verteilung. Hier konnten erste Resultate an PTB-Strahlrohren bei Teilchengrößen von 100 nm bis 200 nm erzielt werden. Um eine Größenordnung kleinere Partikel zu untersuchen, wurde die Nutzung eines bei BESSY II vorhandenen Strahlrohrs für Kleinwinkelstreuung des Helmholtz-Zentrums Berlin vereinbart und die für die Messungen notwendigen Modifikationen vorbereitet. An einem anderen Strahlrohr, das für die referenzprobenfreie Untersuchung mit Röntgenfluoreszenz einge-

setzt wird, konnten Multischichtsysteme im Nano- und Mikrometerbereich untersucht und sowohl die Schichtdicken als auch die Elementzusammensetzung der Schichten bestimmt werden.

Eine Nano-Metrologie mit ganz anderen Methoden wird in einer Kooperation mit dem National Physical Laboratory (NPL), dem nationalen Metrologie-Institut Großbritanniens, verfolgt. Dort werden im Rahmen eines EU-geförderten Projekts SQUID-Magnetometer entwickelt, die einzelne Elektronen-Spins nachweisen sollen. Die Nano-SQUIDs mit einem Durchmesser von 370 nm liefert das NPL, die aus 16 SQUIDs aufgebauten Vorverstärker stammen aus der PTB-Produktion (Bild 10). Die bei flüssigem Helium betriebenen Sensoren erreichen eine Nachweisempfindlichkeit von 2 Elektronenspins pro $\text{Hz}^{1/2}$.

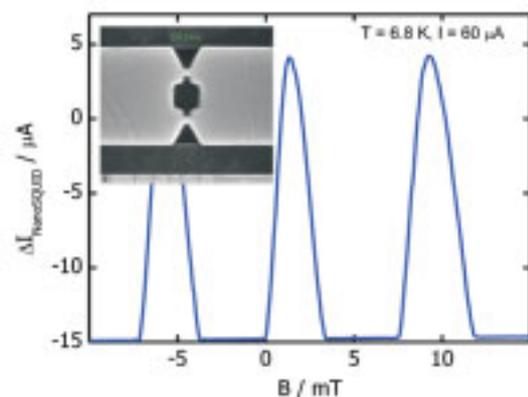


Bild 10: Kennlinie eines NPL-Nano-SQUIDs zur Einzelspin-Detektion, aufgenommen mit einem PTB-SQUID-Verstärker

Metrologie für die Weltraumforschung

Wie bisher hat die PTB ihre messtechnischen Möglichkeiten in der Radiometrie für die Unterstützung von astronomischen und Weltraummissionen auf höchstem metrologischem Niveau genutzt. Darunter sind weiterhin sowohl Untersuchungen der Sonnenaktivität mit ihrer Relevanz für die Vorhersage der Klimaentwicklung als auch Missionen zur Erforschung der Tiefen des Universums.

Bei Sonnenuntersuchungen im VUV-Bereich gibt es eine jahrelange erfolgreiche Zusammenarbeit mit dem Rutherford Appleton Laboratory in Großbritannien. So fand zum wiederholten Male im Mai eine hochwertige Charakterisierung des Transfornormals für das Extreme Ultraviolet Normal Incidence Spectrometer EUNIS statt, das die Rückführung der damit durchgeführten Kalibrierung von Sonnenbeobachtungssatelliten im Welt- raum per Raketenmissionen der NASA auf das primäre Strahlungsnormal BESSY II ermöglicht. Bei 17 nm Wellenlänge konnte das Flugmodell des SWAP (Sun Watcher with APS detectors and image Processing) kalibriert und damit künftig auch eine geringe Unsicherheit für die Bestimmung der EUV-Strahlung der Sonne erreicht werden.

Unvergleichlich mehr Energie ist im Spiel, wenn Neutronensterne verschmelzen oder schwarze Löcher entstehen. Dabei werden extrem hochenergetische Gammastrahlungsblitze ausgesandt, deren Entstehung noch

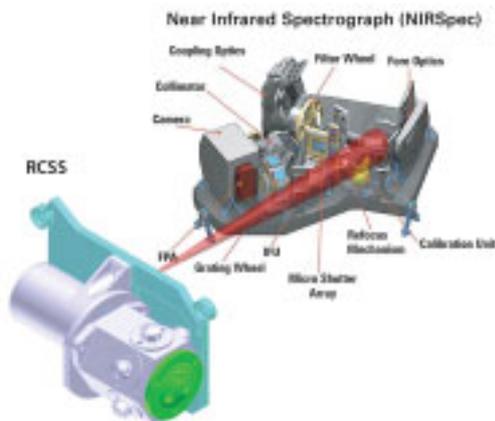


Bild 11: Schema zur Kalibrierung des Infrarot-Spektrometers NIRSPEC auf dem James Webb Space Telescope – im Vordergrund die von der PTB mitentwickelte absolute Kalibrierquelle RCSS.

nicht völlig aufgeklärt ist. Zu deren Untersuchung wurde am 11. Juni 2008 von der NASA das Observatorium GLAST (Gamma-ray Large Area Space Telescope) gestartet. Die NaJ-Szintillationsdetektoren des an Bord befindlichen GLAST Burst Monitors wurde mit Synchrotronstrahlung von BESSY II charakterisiert und kalibriert.

Als Nachfolger des Hubble-Weltraumteleskops soll 2013 das James Webb Space Telescope (JWST) gestartet werden, das den Himmel u. a. auf extrem schwache Strahlungsquellen im infraroten Spektralbereich absuchen soll. Das dafür vorgesehene Spektrometer NIRSPEC muss mit sehr schwacher Strahlung im Bereich zwischen 0,7 μm und 5 μm kalibriert werden, was bisher bei keinem renommierten metrologischen Staatsinstitut durchführbar ist. Die PTB hat daher in Zusammenarbeit mit der EADS Astrium GmbH eine geeignete spezielle Strahlungsquelle (Bild 11) entwickelt, die auf die radiometrischen Primärnormale der PTB zurückgeführt wird. Sie wird bei der deutschen Eröffnung des Internationalen Jahres der Astronomie am 20. Januar 2009 im Museum für Kommunikation in Berlin zu sehen sein.

Thermometrie bei hohen und bei tiefen Temperaturen

Neben der weiter zu optimierenden Basisarbeit der Abteilung, ihren wichtigen Dienstleistungen im Bereich von unterschiedlichsten Kalibrierungen für Industrie und Gesellschaft, die das metrologische Rückgrat im Bereich angewandter Thermometrie bildet, finden die spektakuläreren Entwicklungen allerdings eher an den Rändern dieses Temperaturbereichs statt.

So sind weitere für die Praxis nützliche Ergebnisse bei der Herstellung von Temperaturfixpunkten aus Reinstmetallen im oberen Bereich der Internationalen Temperaturskala von 1990 (ITS-90) erzielt worden, bei denen der Einfluss von Verunreinigungen bis 0,2 ppm klassifiziert und korrigiert werden konnte. Im Temperaturbereich darüber zwischen 1000 °C und 2000 °C wurden weitere Metall-Kohlenstoff-Fixpunkte für die Berührungs- und Strahlungsthermometrie entwickelt und erfolgreich zur Kalibrierung

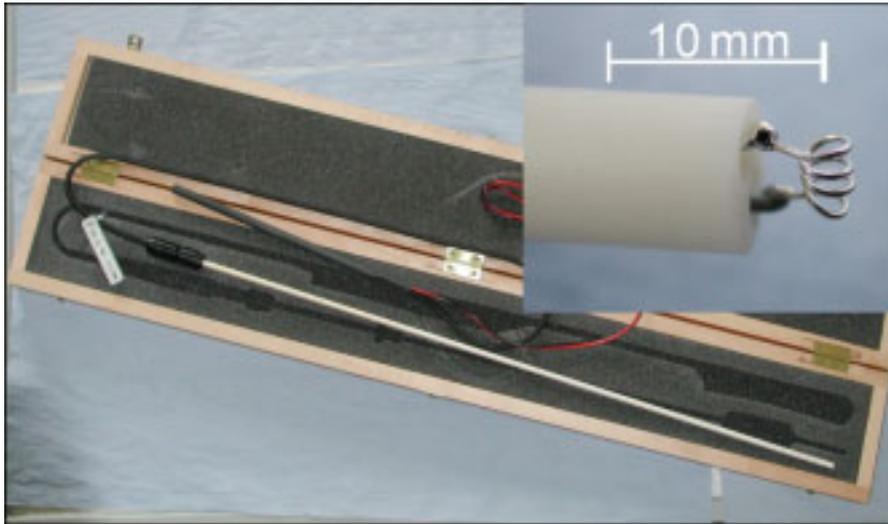


Bild 12: Edelmetall-Thermoelement aus Platin und Palladium mit der vergrößert abgebildeten Messstelle des Thermoelementes

von Edelmetall-Thermoelementen eingesetzt. Auf beiden Gebieten konnten sehr gute Promotionen abgeschlossen werden. Neu entwickelte Edelmetall-Thermoelemente (Bild 12) haben sich im Laufe des Jahres als stabile kostengünstige Alternative zu Widerstandsthermometern entwickelt. Im Rahmen von grundsätzlichen Untersuchungen der Einsatzmöglichkeiten von hochstabilen Thermoelementen wurden auch deren Hauptbestandteile, die Drähte, auf Inhomogenitäten untersucht und deren Einfluss auf die Messunsicherheit bestimmt.

Bei ultratiefen Temperaturen unterhalb von 0,001 K bis in den Bereich von 0,00001 K wird zur Temperaturmessung bisher nur eine einzige Methode verwendet, die Messung der gepulsten Kernspinresonanz von Platin. Um diese Extrapolationsmethode besser abzusichern, kann man neben natürlich vorkommendem Platin (ca. 30 % ^{195}Pt) zum Vergleich Proben mit angereichertem Platin verwenden (ca. 90 % ^{195}Pt). Trotz der höheren Dichte von magnetischen Kernmomenten waren auch hier keine Anzeichen einer spontanen magnetischen Ordnung zu beobachten. Die verkürzte Spin-Spin-Relaxationszeit hatte ebenso wie das abweichende Curie-Weiss-Verhalten ihre Ursache in einer Verunreinigung durch 100 ppm Eisen. Auch diesen Arbeiten und in ihrem Zusammenhang der Darstellung und Weitergabe der Provisional Temperature Scale of 2000 (PLTS-2000) und ihrer Harmonisierung mit der ITS-90 wurden vom Wissenschaftsrat sehr gute bis exzellente Qualität bescheinigt.

Um bei knappem Personal die Bearbeitung neuer Arbeitsgebiete optimal zu gestalten, sind Studien über neue Methoden und deren Anwendungen wichtige Hilfsmittel. So wurde ausführlich untersucht, welche Messverfahren in der Thermometrie künftig den Anforderungen nach reduzierter räumlicher Auflösung und kürzerer Reaktionszeit genügen können und wo deren Entwicklungspotenziale liegen. Eine Studie zur Mikrothermometrie befindet sich inzwischen in der internen Diskussion und wird im Laufe des kommenden Jahres Angaben zu Zeitplänen, Meilensteinen und Ressourcenbedarf enthalten.

Das Boltzmann-Projekt

Anfang April fand in Paris der diesjährige Statusworkshop des internationalen Boltzmann-Projekts zur genaueren Bestimmung der Boltzmann-Konstante statt, mit deren Hilfe man die Basiseinheit der Temperatur, das Kelvin, im Jahre 2011 neu definieren möchte. Die PTB benutzt dafür das Dielektrizitätskonstanten-Gasthermometer, das sie seit vielen Jahren bei tiefen Temperaturen zwischen 3 K und 25 K einsetzt.

Gelegentlich gewinnt man überraschende Ergebnisse, wenn man an die Grenzen der Messbarkeit geht, was hier bedeutet, die Kapazität eines mit Heliumgas gefüllten Kondensators bei den genannten tiefen Temperaturen mit einer relativen Unsicherheit von 10^{-9} zu messen. Hierbei konnte eine zu tieferen Temperaturen zunehmende Abweichung der molaren Polarisierbarkeit von ^4He vom theoretischen Wert beobachtet werden, die beim Isotop ^3He nicht auftrat (Bild 13).

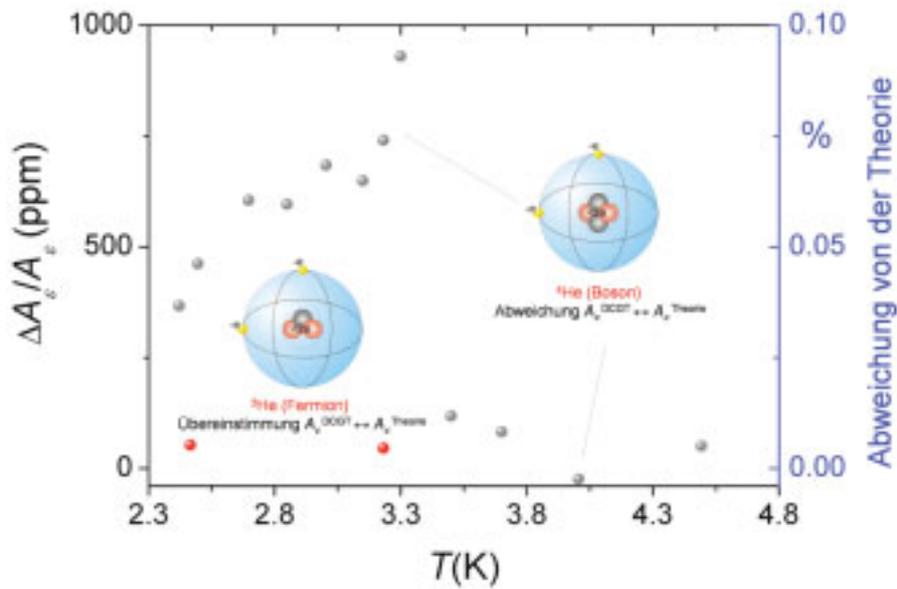


Bild 13: Atomclusterbildung im bosonischen ${}^4\text{He}$ oberhalb der Verflüssigungstemperatur. Während es bei ${}^3\text{He}$ keine Abweichungen von der Theorie gibt, zeigt ${}^4\text{He}$ in der Gasphase eine Abweichung unterhalb von 3,3 K.

Dieses Resultat weist auf die Bildung von Atomclustern des Isotops ${}^4\text{He}$ hin, die schon deutlich oberhalb der Verflüssigungstemperatur auftreten und bosonischen Charakter haben. Auch hier konnte eine Promotion erfolgreich abgeschlossen werden – mit Auszeichnung. Der Kommentar des Wissenschaftsrats hierzu lautete: „Eine führende Rolle spielen die F&E-Arbeiten der PTB im Rahmen des internationalen Boltzmann-Projekts zur genauen Bestimmung der Boltzmann-Konstante, das zu den herausragenden aktuellen metrologischen Vorhaben zählt.“

In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

(diese und weitere Nachrichten ausführlich im Web-Jahresbericht unter www.ptb.de)

Grundlagen der Metrologie

Metrology Light Source (MLS):

Primäres Strahlernormal: Die Instrumentierung für die Messung aller für die Berechnung der Strahlstärke der MLS nach der Schwinger-Theorie benötigten Speicherringparameter wurde erfolgreich in Betrieb genommen. Die Bestimmung dieser Parameter mit kleiner Unsicherheit ist die Grundvoraussetzung zum Betrieb der MLS als berechenbare Strahlungsquelle. Der Elektronenstrom wurde über mehr als 11 Dekaden kontrolliert eingestellt und gemessen. Bei Strömen unterhalb von ca. 1 nA erfolgte die Strommessung durch das Zählen einzelner Elektronen. Die Energie der gespeicherten Elektronen wurde mit der Methode der Compton-Rückstreuung von Laserphotonen im gesamten Bereich der Elektronenenergien von 105 MeV bis 630 MeV bestimmt. Erste Messungen mit unabhängig kalibrierten Filtrerradiometern am MLS-Weißlichtstrahlrohr zeigten eine sehr gute Übereinstimmung. (R. Klein, FB 7.1, roman.klein@ptb.de)

UV- und VUV-Radiometrie gestartet: In Berlin-Adlershof ist Anfang des Jahres 2008 das Strahlrohr für Detektorkalibrierung und Reflektometrie im UV- und VUV Spektralbereich vom Elektronenspeicherring BESSY II in das Willy-Wien-Laboratorium transferiert und dort an der Metrology Light Source (MLS) erfolgreich in Betrieb genommen worden. Nach dem Commissioning im April wurden bereits umfangreiche Messungen im Rahmen von Dienstleistungen und verschiedenen Forschungs Kooperationen durchgeführt. Das Programm für den Auf- und Ausbau von UV- und VUV-Radiometrie wird in den Jahren 2009 und 2010 fortgesetzt mit der Nutzung der MLS als Primärnormal für die Kalibrierung von Strahlungsquellen und mit der Erschließung von Undulatorstrahlung hoher Intensität und Polarisation. (M. Richter, FB 7.1, mathias.richter@ptb.de)

Polarisationsmessungen von VUV-Strahlung: Im Rahmen einer Diplomarbeit an der Fachhochschule für Technik und Wirtschaft (FHTW) in Berlin wurde ein polarisationsempfindlicher Detektor für VUV-Strahlung entwickelt und

an der der Metrology Light Source getestet und eingesetzt. Die dadurch erweiterten Messmöglichkeiten für polarisationsempfindliche UV- und VUV-Reflektometrie mit kleinen Unsicherheiten wurden anschließend bei der Untersuchung von Dünnschichtpolarisatoren im Rahmen einer Forschungs Kooperation mit dem Institut d'Optique in Palaiseau (Frankreich) eingesetzt. (A. Gottwald, FB 7.1, alexander.gottwald@ptb.de)

Größenbestimmung von Nanopartikeln mit Röntgenkleinwinkelstreuung

Im Rahmen des neuen EMRP-Projekts 'Nanoparticles' sollen Größe und Größenverteilung von Nanopartikeln rückführbar mit verschiedenen Methoden im Laboratorium der PTB bei BESSY II mit Röntgenkleinwinkelstreuung (small angle X-ray scattering, SAXS) bestimmt werden. Für erste Messungen mit Teilchendurchmessern zwischen 100 nm und 200 nm konnte der Durchmesser bereits mit der vorhandenen Instrumentierung bestimmt werden. Um auch Teilchendurchmesser bis hinunter zu 10 nm bestimmen zu können, wurde eine Vereinbarung mit dem Helmholtz-Zentrum-Berlin (HZB, früher Hahn-Meitner-Institut) getroffen, die den Einsatz der SAXS-Anlage des HZB im PTB-Laboratorium bei BESSY II ermöglicht. Die Anlage beinhaltet u. a. einen wesentlich größeren ortsauflösenden Detektor (Durchmesser 160 mm statt 30 mm) und ermöglicht eine deutlich größere Variation des Detektorabstands von der Probe. (M. Krumrey, FB 7.1, michael.krumrey@ptb.de)

Methodischer Vergleich zwischen hochauflösender Röntgenemissions- und absorptionsspektroskopie

Um das Speziationspotential hochauflösender Röntgenemissions- und Absorptionsspektroskopie zu qualifizieren, wurden systematische Untersuchungen an verschiedenen Titanverbindungen durchgeführt. Komplementäre Messungen in den Spektralbereichen weicher und harter Röntgenstrahlung ergaben ein umfassendes Bild über die spezifischen Vorteile der einzelnen Methoden und belegen die analytische Informationstiefe, die sich durch eine Kombination beider Ansätze ergibt. (B. Beckhoff, FB 7.1, burkhard.beckhoff@ptb.de)

Bestimmung atomarer Fundamentalparameter mittels hochauflösender Röntgenemissionsspektrometrie

Am Plangittermonochromator-Strahlrohr für Undulatorstrahlung der PTB bei BESSY II wurde eine Spektrometereinheit für weiche Röntgenstrahlung (< 2 keV) erfolgreich auf ihre spektrale Empfindlichkeit und ihr Ansprechverhalten charakterisiert. Damit konnten erste atomare Fundamentalparameter wie z. B. Übergangswahrscheinlichkeiten für die quantitative Beschreibung der Nickel L-Fluoreszenzstrahlung mit kleinen relativen Unsicherheiten ermittelt werden. (B. Beckhoff, FB 7.1, burkhard.beckhoff@ptb.de)

VUV-Kalibrierungen im Weltall

Mit der NASA-Raketenmission EUNIS (Extreme Ultraviolet Normal Incidence Spectrometer) wurden seit 2006 wiederholt Sonnenbeobachtungssatelliten im Weltraum rekali-briert, mit denen die von der Sonne emittierte VUV-Strahlung quantitativ untersucht wird, etwa in Hinsicht auf deren Einfluss auf die höheren Erdatmosphärenschichten und das globale Klima. Die rückführbare Kalibrierung des EUNIS-Instrumentes selbst erfolgt dabei regelmäßig am von der PTB als primäres Strahlernormal genutzten Speicherring BESSY II sowie am Rutherford Appleton Laboratory (RAL) über Hohlkathodenstrahler als Transfernormale. Der große Erfolg der EUNIS-Missionen basiert größtenteils auf der hochwertigen Charakterisierung des Instrumentes, wie sie zuletzt im Mai 2008 im Rahmen einer Kooperation zwischen PTB und RAL durchgeführt wurde. (W. Paustian, FB 7.1, wolfgang.paustian@ptb.de)

Kalibrierung der Radiometric Calibration Spectral Source für das James Webb Space Telescope

Das James Webb Space Telescope (JWST) soll als Nachfolger des Hubble-Weltraumteleskops 2013 in Dienst gestellt werden. Eines der wissenschaftlichen Instrumente des JWST ist NIRSpec, ein im nahen Infrarot von $0,7 \mu\text{m}$ bis $5 \mu\text{m}$ spektral auflösendes Teleskop für extrem schwache Strahlungsquellen, wie z.B. Planeten in anderen Sonnensystemen. NIRSpec soll mit einer speziellen Strahlungsquelle, der Radiometric Calibration Spectral Source (RCSS) kalibriert werden. In einem Projekt mit der Firma EADS Astrium GmbH zur Kalibrierung der RCSS hat die PTB ein Kalibrierkonzept für Strahlungsquellen mit sehr geringem Photonenfluss ($< 10^7$ Photonen $\mu\text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) unter Weltraumbedingungen entwickelt. Dazu wurden der Strahldichtekomparator-Messplatz und der Messplatz mit reduziertem Strahlungshintergrund der PTB weiterentwickelt. Sie ermöglichen nun eine Rückführung weltraumgestützter Infrarot-Teleskope auf die radiometrischen und thermometrischen Primärnormale der PTB. (D. Taubert, C. Monte, FB 7.3, dieter.taubert@ptb.de, christian.monte@ptb.de)

Messungen der spektralen Empfindlichkeit von SWAP

Im Rahmen der Kooperation mit dem Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung wurde das Flugmodell für den Sun Watcher with APS detectors and image Processing – SWAP – im Reflektometer der PTB im Wellenlängenbereich um 17 nm kalibriert. Damit stehen der Sonnenphysik absolute Messwerte für die Emission der Sonne im EUV mit geringen Unsicherheiten zur Verfügung. (F. Scholze, FB 7.1, frank.scholze@ptb.de)

Kalibrierung von γ -Strahlungs-Detektoren für GLAST

Am 11. Juni 2008 wurde in Cape Canaveral das Weltraumobservatorium GLAST (Gamma-ray Large Area Space Telescope) erfolgreich gestartet. Mit GLAST sollen hauptsächlich sog. Gammablitz (gamma ray bursts) untersucht werden, deren Ursache in der Verschmelzung von Neutronensternen oder der Entstehung von schwarzen Löchern liegen könnte. Die wissenschaftlichen Instrumente an Bord sind das Large Area Telescope (LAT) und der GLAST Burst Monitor (GBM). Die NaJ-Detektoren des GBM wurden durch die PTB im Bereich vergleichsweise niedriger Photonenenergien (10 keV bis 60 keV) mit Synchrotronstrahlung bei BESSY II kalibriert. (M. Krumrey, FB 7.1, michael.krumrey@ptb.de)

Neuartiger SQUID-Multiplexer

In zukünftigen Instrumenten der Röntgenastrophysik werden supraleitende Tieftemperatur-Strahlungsdetektoren benötigt. Für die Auslesung vieler dieser Detektoren sind Selektionsschaltnetze, sogenannte „Multiplexer“, erforderlich. Derartige Multiplexer werden bei der Betriebstemperatur der Strahlungsdetektoren eingesetzt, typischerweise im Temperaturbereich unterhalb 1 K. In der PTB wurden neue kryoelektronische Multiplexer auf der Basis von Supraleitenden Quanteninterferometern (SQUIDs) entwickelt und hergestellt. Gegenüber dem bisherigen Stand der Technik sind diese SQUID-Multiplexer empfindlicher, schneller, kompakter und verlustleistungsärmer. Die Anwendung dieser neuen Multiplexer zur Auslesung von höchstempfindlichen supraleitenden Mikrokalorimetern für weiche Röntgenstrahlung wurde gemeinsam mit Kooperationspartnern am NASA Goddard Space Flight Center demonstriert und in einer gemeinsamen Publikation vorgestellt. (J. Beyer, FB 7.5, joern.beyer@ptb.de)

Reflexionsgraderhöhung von Röntgenspiegeln durch Kohlenstoffbeschichtung
Röntgenspiegel für den Photonenenergiebereich von 1 keV bis 10 keV können nur mit flachem Einfallswinkel der Strahlung (unter 1°) betrieben werden. Die Spiegeloberfläche ist meist mit dünnen Metallschichten (z. B. Au, Pt oder Ir) versehen, um einen hohen Reflexionsgrad zu erzielen. Allerdings liegen die M-Absorptionskanten der Metalle in diesem Energiebereich, sodass der Reflexionsgrad dort eine starke Struktur aufweist. Gemeinsam mit der European Space Agency (ESA) und dem Danish National Space Centre durchgeführte Untersuchungen haben gezeigt, dass durch das Aufbringen einer zusätzlichen dünnen Kohlenstoffschicht (5 nm bis 10 nm Dicke) der Reflexionsgrad im Bereich der Absorptionskanten wesentlich glatter verläuft und oberhalb der Kanten auch deutlich erhöht werden kann. Derartige Beschichtungen sollen daher bei Spiegeln für zukünftige Röntgenmissionen eingesetzt werden. (M. Krumrey, FB 7.1, michael.krumrey@ptb.de)

Pulsdauermessungen am Femtosekunden-Röntgenlaser FLASH

In Zusammenarbeit zwischen PTB, DESY (Hamburg), BESSY (Berlin) und der Universität Münster wurden für den Freie-Elektronen-Laser in Hamburg FLASH die weltweit ersten Pulsdauermessungen im Femtosekundenbereich an einem Röntgenlaser durchgeführt. Das Messprinzip basiert auf der Verwendung eines Autokorrelators für weiche Röntgenstrahlung und der quantitativen Untersuchung der direkten Zwei-Photonen-Doppelionisation von Helium. Erste Messergebnisse im Bereich zwischen 30 fs und 40 fs bei einer Laserwellenlänge von 24 nm bestätigen theoretische Vorhersagen. (M. Richter, FB 7.1, mathias.richter@ptb.de)

NanoSQUIDs – Magnetometer zur Detektion einzelner Spins

Im Rahmen des von der EU geförderten Projekts „NanoSpin“ entwickelt die PTB gemeinsam mit dem NPL Supraleitende Quanteninterferometer (SQUIDs) mit einem sehr kleinen Durchmesser des supraleitenden SQUID-Rings von derzeit ca. 370 nm. Die Josephson-Kontakte dieser SQUIDs, die vom NPL mittels Photolithographie und Ionenstrahl-Ätztechnik in Niob/Wolfram-Technologie gefertigt wurden, werden durch nanostrukturierte Brücken (65 nm breit und 80 nm lang) im Niobfilm gebildet. Diese Nano-SQUIDs werden mit einem 16 SQUID-Serienarray der PTB, das als Vorverstärker für das Nano-SQUID-Signal dient, in einer Flussregelschleife betrieben. Dabei wird die Betriebstemperatur des Nano-SQUIDs in einem Kryostaten mit variabler Temperatur auf eine Temperatur im Bereich zwischen 4,2 K und 12 K eingestellt. Das mit dieser Anordnung erzielte Flussrauschen entspricht einer Nachweisempfindlichkeit von ca. 2 Elektronenspins pro $\text{Hz}^{1/2}$. (Th. Schurig, FB 7.5, thomas.schurig@ptb.de)

Kooperation mit dem DLR zur THz-Radiometrie

Um die Strahlungsleistung von THz-Lasern rückgeführt auf das Internationale Einheitensystem SI zu messen und auf diese Weise die Leistungsempfindlichkeit von THz-Strahlungsempfängern präzise zu kalibrieren, kooperiert die PTB mit dem Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrttechnik (DLR). Nach Umbau eines Kryoradiometer-Messplatzes der PTB für die große Wellenlänge von 120 μm eines THz-Quantenkaskadenlasers des DLR konnte die spektrale Empfindlichkeit eines pyroelektrischen THz-Detektors erstmals gegen ein Kryoradiometer mit kleiner Messunsicherheit bestimmt werden. (A. Steiger, FB 7.2, andreas.steiger@ptb.de)

Kernmagnetische Resonanz an ^{195}Pt

Gepulste Kernspinresonanz an Platin stellt die zur Zeit einzige zuverlässige Methode zur Bestimmung von Temperaturen unterhalb von 0,001 K dar. Ihre Anwendbarkeit bis in den Bereich der tiefsten erreichbaren Temperaturen wird lediglich durch magnetische Ordnungsphänomene des Kernspinsystems begrenzt. Um mögliche Abweichungen des Kernspinsystems vom paramagnetischen Verhalten durch kooperative Wechselwirkung zu untersuchen, wurden NMR-Messungen an angereichertem ^{195}Pt (93,52 %) bei Gleichgewichtstemperaturen bis unterhalb 100 mK durchgeführt und mit denen an natürlichem Platin mit einer Abundanz des magnetischen Isotops ^{195}Pt von 33,8 % verglichen. Die Ergebnisse zeigen eine Konstanz der Spin-Spin-Relaxationszeit des angereicherten Platins von $t_2 = 140 \mu\text{s}$ bis zu den tiefsten gemessenen Temperaturen und noch keine Anzeichen einer kernmagnetischen Ordnung. Der gegenüber natürlichem Platin ($t_2 = 1,2 \text{ ms}$) reduzierte Wert von t_2 und die gemessene Abweichung der longitudinalen Magnetisierung von einem Curie-Weiss-Verhalten sind auf die Wechselwirkung der elektronischen Momente magnetischer Verunreinigungen (100 ppm Fe) mit den Kernmomenten zurückzuführen. (P. Strehlow, FB 7.5, peter.strehlow@ptb.de)

Strahlungsquellen für die Radiometrie im nahen Infrarot

Als neue Strahlungsquellen für die Radiometrie im nahen Infrarot wurden zwei Lasersysteme getestet. Das eine System, eine Eigenentwicklung eines kontinuierlich strahlenden optisch parametrischen Oszillators (cw-OPO), wurde zur Kalibrierung zweier Detektornormale, einer InGaAs- und einer Germanium-Photodiode, bei mehreren Wellenlängen zwischen 1550 nm und 1800 nm eingesetzt. Damit gelang der Nachweis, einen cw-OPO mit seiner Signal- und Idler-Strahlung in Einmodenqualität im Spektralbereich von 1400 nm bis 4000 nm für Kalibrierzwecke zu verwenden. Die zweite Strahlungsquelle, eine faser-gekoppelte Weißlichtquelle, emittiert breitbandige Strahlung zwischen 450 nm und 2500 nm gepulst mit einer Pulsdauer im ps-Bereich und einer Wiederholfrequenz von 80 MHz. Mit dieser quasi-cw-Weißlichtquelle wurde am gleichen Messplatz ebenfalls die spektrale Empfindlichkeit der Photodioden bestimmt. Die Kalibrierungen mit beiden Strahlungsquellen stimmen mit bisherigen Ergebnissen im Rahmen der Unsicherheiten überein, wobei für InGaAs-Photodioden eine Abweichung zwischen gepulster und kontinuierlicher Strahlung von kleiner als 5 Promille nachgewiesen wurde. (R. Müller, A. Steiger, FB 7.2, ralf.mueller@ptb.de)

Bosonische Wechselwirkung im Helium-4-Gas

Erstmals konnte der grundsätzlich unterschiedliche Quantencharakter der beiden Isotope Helium-4 (Boson) und Helium-3 (Fermion) mit dem Dielektrizitätskonstanten-Gasthermometer in der Gasphase nachgewiesen werden. Bei Temperaturen unter 3,3 K wurde in Helium-4 eine Abweichung der molaren Polarisierbarkeit vom theoretischen Wert gemessen, die auf die Bildung von Clustern mit spezieller Wechselwirkung zwischen den Gasatomen zurückgeführt werden kann. Dass es sich dabei um bosonische Cluster handeln muss, wurde durch Messungen mit fermionischem Helium-3 Gas bestätigt, bei dem keine Veränderung der molaren Polarisierbarkeit festgestellt wurde. (Ch. Gaiser, FB 7.4, christof.gaiser@ptb.de)

Präzisionsbestimmung der molaren Polarisierbarkeit von Helium-3

Die bislang ersten Untersuchungen des Isotops Helium-3 mit dem Dielektrizitätskonstanten-Gasthermometer lieferten eine eindeutige Übereinstimmung mit den Ergebnissen thermodynamischer Temperaturmessungen mit Gasthermometern konstanten Volumens auf höchstem Niveau. So konnte die molare Polarisierbarkeit von Helium-3 erstmals mit bisher unerreichter Messunsicherheit experimentell bestimmt werden. Da in die theoretische Berechnung der Polarisierbarkeit isotopenspezifische Anteile eingehen, sind die so gewonnenen dielektrischen Daten für die Verifizierung theoretischer Modelle von großer Bedeutung. (Ch. Gaiser, B. Fellmuth, FB 7.4, christof.gaiser@ptb.de)

Oxidation von Verunreinigungen in Metallfixpunkten der ITS-90

Aktuell ist der Einfluss von Verunreinigungen in Fixpunkten der größte Beitrag zur Messunsicherheit bei der Darstellung und Weitergabe der ITS-90 im Temperaturbereich von 0 °C bis 1000 °C. Um eine entsprechende Korrektur für Konzentrationen kleiner als 1 ppm durchführen zu können, erachtete man es bisher als ausreichend, den entsprechenden Einfluss durch Dotierungsexperimente im Bereich von ca. 10 ppm bis 100 ppm zu ermitteln. Untersuchungen in der PTB im Konzentrationsbereich von 0,2 ppm bis 20 ppm zeigten jedoch, dass bei einer erheblichen Anzahl von binären Systemen die Verunreinigung als Oxid ausfallen kann und dadurch die Fixpunkttemperatur unverändert bleibt. Durch umfangreiche thermodynamische Berechnungen wurde eine Klassifikation für alle Systeme aus Fixpunktmittel und Verunreinigung erstellt, die eine Entscheidung über die Notwendigkeit einer detaillierten experimentellen Untersuchung des Phasenverhaltens ermöglicht und so zu einer deutlichen Reduzierung des experimentellen Aufwandes führt. (S. Rudtsch, FB 7.4, steffen.rudtsch@ptb.de)

Rückführung einer Pd-C-Fixpunktzelle zur Kalibrierung von Thermoelementen auf die ITS-90

Temperaturen oberhalb der Erstarrungstemperatur von Silber (961,78 °C) sind in der ITS-90 über Strahlungsthermometer definiert. In der industriellen Praxis werden aber häufig Thermoelemente zur Messung hoher Temperaturen bis 2200 °C eingesetzt. Ihre Kalibrierung erfolgt zunehmend an eutektischen Metall-Kohlenstoff-Verbindungen in vertikal zu betreibenden Fixpunktziegeln. Deren Schmelztemperaturen sind entsprechend der ITS-90 mit Strahlungsthermometern zu bestimmen, die messtechnisch bedingt nur horizontal einsetzbar sind. Aus diesem Grund wurde eine konstruktiv veränderte Pd-C-Fixpunktzelle ($T_s = 1492$ °C) gebaut, die auch Messungen in horizontaler Anordnung erlaubt. Durch Vergleichsmessungen an dieser Zelle mit einem Filtrerradiometer, einem Strahlungsthermometer und einem Pt/Pd-Thermoelement wurde die Schmelztemperatur mit einer Messunsicherheit ($k = 2$) von ± 1 K bestimmt. Damit konnte der rückführbare Kalibrierbereich für Thermoelemente von 1330 °C auf 1500 °C erweitert werden. (F. Edler, FB 7.4, frank.edler@ptb.de, K. Anhalt, FB 7.3, klaus.anhalt@ptb.de)

Berücksichtigung der Isotopenzusammensetzung bei der Definition der Basiseinheit Kelvin

Der Einfluss der Isotopenzusammensetzung auf die Temperatur des Wassertripelpunktes wurde in den vergangenen Jahren weltweit untersucht. Auf Empfehlung des Komitees für Thermometrie (CCT) hat das Komitee für Maß und Gewicht (CIPM) die für die Definition des Kelvin zu verwendende Isotopenzusammensetzung des Wassers festgelegt, was von der PTB seit dem 1.8.2008 umgesetzt wird. Gegenüber dem vorherigen nationalen Normal ergibt sich bei Anwendung der genaueren Definition ein um 68 μ K höherer Wert für den Wassertripelpunkt. Gleichzeitig reduzierte sich die Standardunsicherheit ($k = 1$) für die Kalibrierung von Wassertripelpunktzellen von 54 μ K auf 29 μ K. (S. Rudtsch, FB 7.4, steffen.rudtsch@ptb.de)

Metrologie für die Wirtschaft

Neue optische Materialien für die 193-nm-Lithographie

Die lithographische Herstellung der leistungsstärksten Halbleiterbauelemente beruht derzeit auf der Verwendung von ArF-Lasern bei einer Wellenlänge von 193 nm. Durch den Einsatz von Immersionsflüssigkeiten zwischen der letzten Linse der Belichtungsoptik und dem zu belichtenden Silizium-Wafer liegen die erreichbaren Strukturbreiten dabei um Faktoren unter der Belichtungswellenlänge. Bei der Verwendung optischer Materialien mit höherem Brechungsindex können Werte von 32 nm und darunter erreicht werden. An der Metrology Light Source wurde im Rahmen einer Forschungs-kooperation zwischen der PTB und der Schott AG, einem der weltweit führenden Hersteller optischer Materialien für die 193-nm-Lithographie, die VUV-Transmission und -Reflexion hochreiner Granateinkristalle untersucht. (A. Gottwald, FB 7.1, alexander.gottwald@ptb.de)

Bestimmung von Strukturbreiten auf Halbleiterphotomasken mit EUV-Scatterometrie

Im Rahmen des erfolgreich abgeschlossenen ABBILD-Projektes des BMBF hat die PTB unter anderem die Nutzung von EUV-Scatterometrie für die Bestimmung von Strukturbreiten auf Halbleiterphotomasken untersucht. Auf einer EUV-Testmaske des AMTC wurden dazu Messungen im EUV-Reflektometer der PTB durchgeführt, die mit mathematischen Methoden des ZUSE-Institut Berlin ausgewertet wurden. Für Testfelder mit Linienbreiten von nominell 180 nm mit einheitlichem Abstand wurde dabei eine lineare Korrelation der Ergebnisse zu Messungen des AMTC mit einem CD-SEM im Rahmen von 0,2 nm erreicht, für 140 nm breite Linien mit variierenden Abständen eine Korrelation innerhalb von 0,3 nm. Mit diesen Ergebnissen wurde gezeigt, dass die EUV-Scatterometrie in der Lage ist, die Anforderungen für die Messtechnik zukünftiger Maskentechnologie zu erfüllen. (F. Scholze, FB 7.1, frank.scholze@ptb.de)

EUV-Photosensoren für die Lithographie

Für den Betrieb einer EUV-Belichtungs-
maschine sind zur Prozessüberwachung und
Justage eine Vielzahl von optischen Sensoren
im Spektralbereich des EUV notwendig. Im
Rahmen einer wissenschaftlichen Kooperati-
on mit dem ASML und der Universität Delft
wurde die gute Eignung neuartiger Silicium-
Photodioden für diesen Spektralbereich
demonstriert. (F. Scholze, FB 7.1,
frank.scholze@ptb.de)

**Referenzprobenfreie Untersuchung von
Multischichtsystemen im Nano- und
Mikrometerbereich**

Für ein mit einem Industriepartner durchge-
führtes Vorhaben wurden anwendungs-
relevante Multielementmehrfachschicht-
systeme wie „Leadframes“ mittels referenz-
probenfreier Röntgenfluoreszenzanalyse
(RFA) untersucht und mit Ergebnissen des
Projektpartners verglichen. Dabei wurde das
bestehende Quantifizierungsmodell dahinge-
hend erweitert, dass auch Gradienten in der
Elementzusammensetzung einer Schicht
mittels RFA zuverlässig nachgewiesen wer-
den können. (B. Beckhoff, FB 7.1,
burkhard.beckhoff@ptb.de)

PTB/DKD-Richtlinie für Blockkalibratoren

Blockkalibratoren werden sowohl national
als auch international in zunehmenden Maße
für die Kalibrierung von industriellen Wider-
standsthermometern eingesetzt. Untersu-
chungen der PTB und Ringvergleiche inner-
halb des DKD ergaben, dass die hiermit
erreichbaren Messunsicherheiten durch
Hersteller und Anwender zu optimistisch
eingeschätzt wurden und dass insbesondere
Fehler durch die Wärmeableitung nicht
korrekt berücksichtigt worden sind. Darauf-
hin erstellte die PTB eine Kalibrierrichtlinie
für Blockkalibratoren, die auch als
EURAMET-Richtlinie übernommen wurde.
Aktuelle Untersuchungen der neusten Gene-
ration von Blockkalibratoren zeigen, dass
einige Hersteller erhebliche Verbesserungen
ihrer Geräte erzielen konnten, was maßgeb-
lich auf die inzwischen einheitliche Anwen-
dung dieser Kalibrierrichtlinie zurückzufüh-
ren ist. (S. Friederici, FB 7.4,
sven.friederici@ptb.de)

**Au/Pt-Thermoelemente – Alternative zu
Hochtemperaturwiderstandsthermometern?**

Der Temperaturbereich zwischen den
Erstarrungstemperaturen von Aluminium
(660,323 °C) und Silber (961,78 °C) ist in der
ITS-90 über Hochtemperaturwiderstands-
thermometer definiert. Internationale
Vergleichsmessungen (u. a. EUROMET.T- K 4)
offenbarten thermische und mechanische
Instabilitäten dieser Sensoren, die die ange-
strebten Messunsicherheiten (< 10 mK) in
diesem Temperaturbereich in Frage stellen.
Die ersten Ergebnisse metrologischer Unter-
suchungen zur thermoelektrischen Stabilität
und Homogenität eines Au/Pt-Thermoele-
ments mit neuartigen Konstruktions-
elementen (direkt verschweißte Messstelle,
freibewegliche Thermodrähte) rücken Au/Pt-
Thermoelemente als mögliche kostengünstige
und vor allem praktikablere Alternative zu
Hochtemperaturwiderstandsthermometern
ins Rampenlicht. Sehr gute thermoelektrische
Stabilitäten und Homogenitäten in der Grö-
ßenordnung von jeweils 10 mK bis 20 mK
wurden im Ergebnis einer Alterung bei 950 °C
über mehr als 500 Stunden nachgewiesen.
(F. Edler, FB 7.4, frank.edler@ptb.de)

**Nachweis lokaler Inhomogenitäten in
Thermodrähten**

Thermoelemente sind die am weitesten ver-
breiteten elektrischen Sensoren für Tempera-
turmessungen. Die größten Messunsicher-
heiten bei ihrem Einsatz werden durch Inho-
mogenitäten in den Thermodrähten verur-
sacht. Ein Verfahren zum qualitativen Nach-
weis (Ortsbestimmung) und zur quantitativen
Abschätzung der durch sie verursachten
Messfehler ist die „Traveling heater“-Metho-
de. Hier wird eine schmale Zonen definierter
Temperaturerhöhung entlang eines einzelnen
Thermodrahtes bei gleichzeitiger Temperat-
urkonstanz der Enden des Thermodrahtes
gefahren. Dabei ist jede gemessene Änderung
der Thermospannung während der Bewe-
gung der Heizzone ein Indikator für inho-
mogenitätsbedingte und damit Messfehler her-
vorrufende parasitäre Thermospannungen.
Umfangreiche Untersuchungen an Kupfer-
und Platindrähten wurden vom Gastwissen-
schaftler Dr. Y. Abdelaziz (NIS, Kairo) durch-
geführt. Lokale Inhomogenitäten in Thermo-
drähten konnten auf diese Weise eindeutig
identifiziert und ihr Einfluss auf die Mess-
unsicherheiten abgeschätzt werden. (F. Edler,
FB 7.4, frank.edler@ptb.de)

Internationale Angelegenheiten

Draft A für CCPR-Pilotvergleich für spektrale Empfindlichkeit im EUV

Für den gemeinsam mit dem NIST und dem NMIJ unter Leitung der PTB als Pilotlabor durchgeführten CCPR-Pilotvergleich zur spektralen Empfindlichkeit im Spektralbereich von 11,5 nm bis 20 nm (extremen UV, EUV) liegt jetzt der Draft A vor. Dieser bestätigt die internationale Vergleichbarkeit der Messungen der spektralen Empfindlichkeit im Spektralbereich des EUV durch alle in diesem Bereich tätigen NMIs. (F. Scholze, FB 7.1, frank.scholze@ptb.de)

Schlüsselvergleich CCPR S1 zur spektralen Strahldichte abgeschlossen

Aufgrund der großen Bedeutung der spektralen Strahldichte für Photometrie und Radiometrie initiierte das Konsultativ-Komitee für Photometrie und Radiometrie (CCPR) einen Vergleich der spektralen Strahldichte von Bandlampen im Wellenlängenbereich von 220 nm bis 2500 nm. Teilnehmer waren die Staatsinstitute LNE-INM/Cnam (Frankreich), NIST (USA), NRC (Kanada), VNIIOFI (Russland, Pilotlabor) und die PTB. In dem als Sternvergleich aufgebauten Messschema wurden Lampen der einzelnen Staatsinstitute von diesen vermessen und an das Pilotlabor (VNIIOFI) geschickt und dort ebenfalls vermessen. Der Vergleich bestätigt die Übereinstimmung der Realisierung der spektralen Strahldichte an den teilnehmenden Staatsinstituten über nahezu den ganzen Wellenlängenbereich von 220 nm bis 2500 nm auf ± 1 %. (D. Taubert, 7.3 Dieter.Taubert@ptb.de)

Dritter internationaler Workshop zur Bestimmung der Boltzmann-Konstante

In der Tradition der vorangegangenen Workshops zum Vorhaben zur Neudefinition des Kelvin, die 2005 und 2006 in der PTB stattfanden, lud im April 2008 das französische Staatsinstitut LNE-INM/Cnam in Paris zum dritten Workshop dieser Art ein. In 15 Vorträgen wurden die Fortschritte bei der Bestimmung der Boltzmann-Konstante mit unterschiedlichen Methoden einschließlich der von der PTB verfolgten Dielektrizitätskonstanten-Gasthermometrie vorgestellt und diskutiert. Es bestehen damit gute Aussichten, bei weiter anhaltenden Fortschritten termingerecht 2010 einen verbesserten Wert der Boltzmann-Konstante vorzulegen und die Neudefinition des Kelvin in Angriff zu nehmen. (Ch. Gaiser, FB 7.4, christof.gaiser@ptb.de)

Beginn des iMERAPlus-Projekts zur Neudefinition des Kelvin

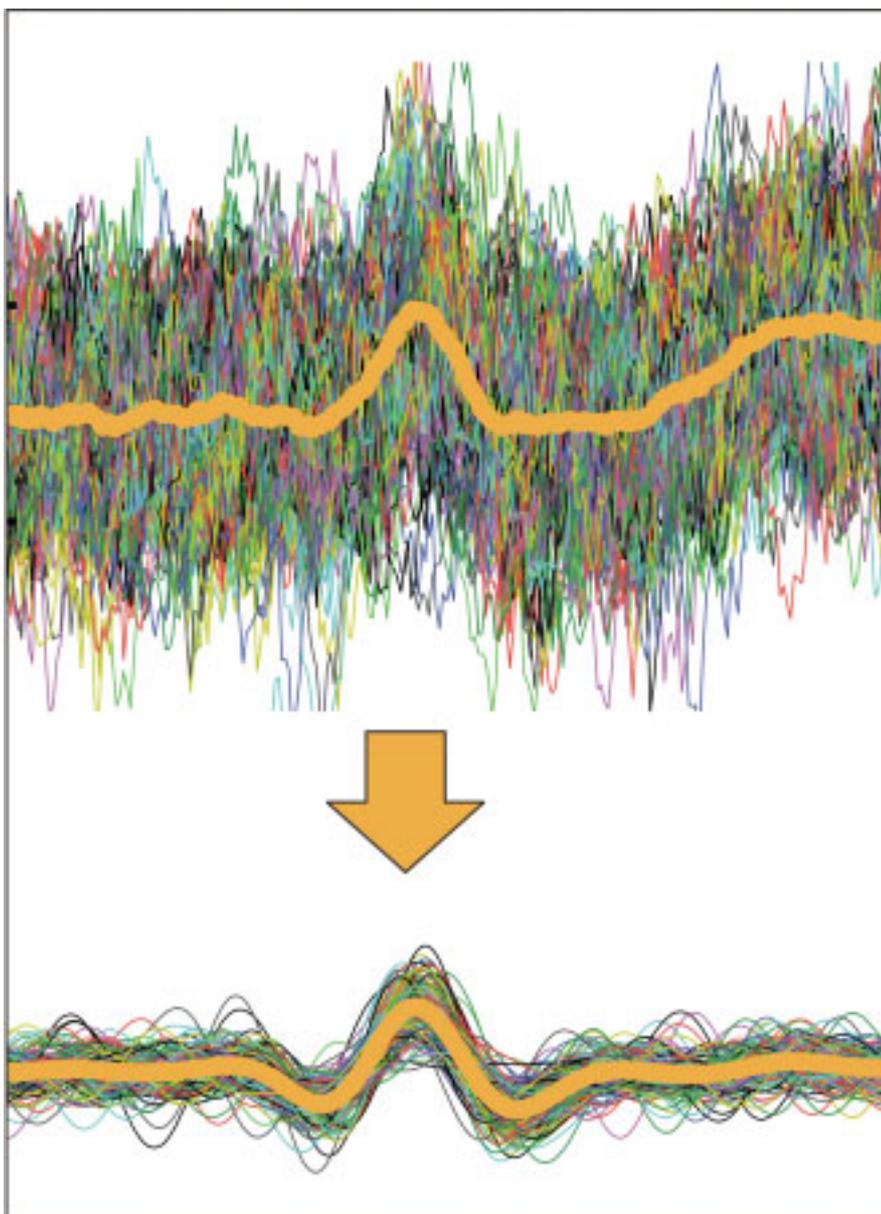
Im Anschluss an den dritten internationalen Workshop zur Bestimmung der Boltzmann-Konstante wurde mit dem Kick-off-meeting der Startschuss für das internationale, von der EU im 7. Rahmenprogramm in erheblichem Umfang geförderte iMERAPlus-Boltzmann-Projekt gegeben. Unter der Koordination der PTB vereint dieses Projekt die Anstrengungen verschiedener europäischer Staatsinstitute, die Präzisionsbestimmung der Boltzmann-Konstante und eine daraus resultierende Neudefinition der Basis-Einheit Kelvin, rückgeführt auf eine unveränderliche Naturkonstante, zu erreichen. (J. Fischer, FB 7.4, joachim.fischer@ptb.de)

Metall-Kohlenstoff Eutektika für eine neue Hochtemperaturskala

Die eutektischen Metall-Kohlenstoff-Legierungen haben im EU-geförderten Projekt Novel High-Temperature metal carbon fixed-points for radiation thermometry, radiometry and thermocouples (HIMERT) ihr Potential als metrologische Temperaturstandards bestätigt und sollen jetzt in eine neue Hochtemperaturskala implementiert werden. Auch hier koordiniert Europa die weltweiten Forschungen. Im EURAMET-Projekt 926 übernehmen das NPL, die PTB und das LNE-INM/Cnam zusammen mit dem japanischen Staatsinstitut NMIJ die Leitung der Arbeitspakete. Das LNE-INM/Cnam und das NMIJ sind zuständig für die Erstellung der Herstellungsvorschriften für eutektische Fixpunktzellen sowie für die Untersuchung ihrer Stabilität. Das NPL und die PTB sind verantwortlich für die Messung und Zuweisung der thermodynamischen Temperaturen der Schmelzpunkte der in Frage kommenden Legierungen (Co-C, Pt-C, Re-C). Der Abschluss des Projekts und die Implementierung der Eutektika in eine neue Hochtemperaturskala ist für 2012 vorgesehen. (K. Anhalt, J. Hartmann, FB 7.3 klaus.anhalt@ptb.de)



Medizinphysik und metrologische Informationstechnik



Berichte der Abteilungen

Abteilung



Medizinphysik metrologisch Information.

Einleitung

Wie schon aus dem Namen der Abteilung ersichtlich ist, umfasst deren Aufgabenspektrum neben der Metrologie für die Medizin auch die Schwerpunkte Informationstechnologie (IT) und Mathematik für die Metrologie.

Während die drei medizinphysikalischen Fachbereiche der Abteilung vorwiegend themenspezifisch F&E-orientiert sind, tritt beim Fachbereich IT der Dienstleistungscharakter mehr in den Vordergrund. Der Fachbereich Mathematik nimmt Querschnittsaufgaben wahr, arbeitet dabei mit vielen experimentellen Fachbereichen der PTB gemeinsam an F&E-Aufgaben und leistet zusätzlich fachliche Beratung. Die Arbeiten der beiden letztgenannten Fachbereiche sollen diesmal näher beleuchtet werden.

IT in Messsystemen

Bereits die Gegenwart, aber noch viel umfassender wird die Zukunft von Messgeräten, -systemen und -prozessen von informationstechnischen Komponenten geprägt sein. Das findet neben der Softwaredurchdringung seinen Ausdruck in verteilten, miteinander kommunizierenden Messsystemen bzw. Komponenten.

Bild 1 symbolisiert diesen Trend beispielhaft. Zwar handelt es sich bei dieser „black box“



Bild 1: Funkmodul für sichere drahtlose Messdatenübertragung

Titelbild:
Signalanalyse einer Magnetenzephalographie-Messung nach auditorischer Stimulation; oben: Rohdaten, unten: bereinigte Daten nach Anwendung räumlicher und zeitlicher Filter

Metrik und neue Messestechnik

um ein konkretes Bauteil, ein Funkmodul, das Bild könnte aber auch für eine Vielzahl von Komponenten stehen, die bereits Bestandteil von (verteilten) Messsystemen sind oder werden können: z. B. Datenbanken, Kommunikationscontroller, Signatureinheiten, Bildverarbeitungseinheiten, mathematische Software. Mit solchen Komponenten können Messdaten gewandelt, verknüpft, gesichert und übertragen werden.

Eine besonders herausfordernde Entwicklung ist die zunehmende Vernetzung von Messgeräten bzw. Verteilung von Messfunktionen unter Einbeziehung des Internet. Die Entwicklung reicht bereits bis in den Bereich der Haushaltszähler, die in Zukunft fern ausgelesen werden sollen („Smart Metering“ oder „kommunikative Zähler“). Das stellt erhöhte Anforderungen an die unterstützende Software und an die Sicherheit der IT-Komponenten und der Messdaten.

Gemeinsam mit der Industrie werden dafür von der PTB neue Konzepte und Verfahren zur sicheren Übertragung und Haltung von Messdaten entwickelt. Darüber hinaus werden in den Forschungs- und Entwicklungsprojekten auch Fragen der Fernsteuerung von Messeinrichtungen und des automatischen Software-Upgrade behandelt. Bei allen Projekten stehen kryptographische Sicherheitsmechanismen und geeignete Datenübertragungsprotokolle im Mittelpunkt. Neben den Sicherungsverfahren besteht das Ziel auch in so genannten Verifikationsverfahren, d. h. Verfahren, mit denen die Authentizität und Integrität der übertragenen Daten bzw. der

aufgeladenen Software nachgewiesen und die Daten selbst rekonstruiert werden können.

Ein aktuelles Beispiel ist ein von der Energiewirtschaft gefördertes Projekt über einen neu entwickelten Zählertyp, den so genannten taktasynchronen Lastgangzähler.

Der Trend zu immer komplexeren Messsystemen hat auch erhebliche Auswirkungen auf den Prüfgegenstand, auf die Prüftiefe und den -aufwand bei den im gesetzlichen Messwesen erforderlichen Prüfungen. Grundsätzlich wurde diese Entwicklung bei der Ausarbeitung der jüngsten Softwareleitfäden in der WELMEC und in der OIML bereits berücksichtigt. In der täglichen Praxis entstehen jedoch neue Fragen. Das erfordert individuelle Analysen und Bewertungen, die über die aus Leitfäden ableitbare Abarbeitung von Checklisten hinausgehen.

Während Sicherheitsaspekte von Messdaten einen starken Bezug zu den im gesetzlichen Messwesen eingeforderten Schutzfunktionen haben, ist die Softwarequalität eine übergreifende Fragestellung über alle metrologische Disziplinen. Software ist immanenter Bestandteil metrologischer Systeme und bestimmt die Zuverlässigkeit entscheidend mit.

Aufgrund der zunehmenden Komplexität und der wachsenden Abhängigkeit metrologischer Funktionen von Software wachsen die Bedenken in Bezug auf die Qualität der Software und damit auf die Zuverlässigkeit der metrologischen Systeme. Momentan existiert keine breit akzeptierte und geeignete

Grundlage, die als Referenz für die Entwicklung und eine einheitliche Bewertung metrologischer Software herangezogen werden könnte. Allgemeine Softwarenormen sind aus der Sicht der Metrologie zu unspezifisch und somit als direktes Arbeitsmittel nicht geeignet.

In den Jahren 2007 und 2008 wurde daher in Zusammenarbeit mit dem NPL ein Initialdokument erarbeitet, in dem Grundprinzipien für einen internationalen Leitfaden aufgestellt worden sind, der nach dem Muster des weltweit akzeptierten Guide to the Expression of Uncertainty (GUM) eine entsprechende Rolle für metrologische Software darstellen könnte.

Mathematik für die Metrologie

Der Fachbereich *Mathematische Modellierung und Datenanalyse* wurde 2004 als Ergebnis der im Jahr 2002 durchgeführten Evaluation der PTB neu gegründet. Ziel war eine deutliche Verstärkung von mathematischen Aktivitäten innerhalb der PTB nach dem Vorbild anderer führender Staatsinstitute (NIST, NPL), in denen forschungsstarke Mathematik-Gruppen eine lange Tradition haben. Inzwischen ist der Fachbereich innerhalb der PTB sowie national und international ausgezeichnet vernetzt und arbeitet an vielen Stellen mit Kollegen aus den experimentellen Fachbereichen der PTB sowie aus Universitäten und anderen Instituten zusammen. Eine weitere Entwicklung ist die Herausbildung eines informellen europäischen Netzwerks von Arbeitsgruppen und Einzelpersonen, die innerhalb der nationalen Metrologieinstitute (NMIs) an mathematischen Fragestellungen arbeiten. Dies manifestiert sich unter anderem in der EUROMET Focus Group „Mathematics and Software“, die beim Technical Committee „Interdisciplinary Metrology“ (TC INTMET) angesiedelt ist und von Wissenschaftlern der PTB koordiniert wird.

Mathematische Modellierung und Datenanalyse stellen wichtige Querschnittsaufgaben dar, die in vielen modernen Gebieten der Metrologie von wachsender Bedeutung sind. Wichtige Gebiete sind u. a.:

- Verfahren zur Bestimmung von Messunsicherheiten und zur Analyse internationaler Ringvergleiche

- virtuelle Experimente (Simulationen zur Entwicklung neuer Messmethoden) und mathematische Auswerteverfahren
- numerische Verfahren für kontinuierliche Modelle (partielle Differentialgleichungen), inverse Probleme und Optimierung
- Methoden zur Signalverarbeitung und Datenanalyse.

Im Folgenden seien einige aktuelle Beispiele herausgegriffen, die zusammen mit anderen Arbeitsgruppen der PTB bearbeitet wurden.

Analyse dynamischer Messungen

Bei der Bestimmung zeitabhängiger physikalischer Größen wie z. B. mechanischer Kräfte und Beschleunigungen, elektrischer Hochspannungsimpulse, zeitabhängiger Temperaturverläufe und Biosignale wie EKG und EEG handelt es sich um dynamische Messungen. Häufig kann das gewünschte proportionale Ein-/Ausgangsverhalten eines solchen Messsystems aber nur für niederfrequente Signale realisiert werden. Bei Messung breitbandiger Signale entsteht dann die so genannte dynamische Messabweichung. Deren Kompensation erfordert eine Signalnachbearbeitung, die als digitale Filterung des Ausgangssignals realisiert werden kann. Der Entwurf dieses Filters setzt ein bekanntes Übertragungs-

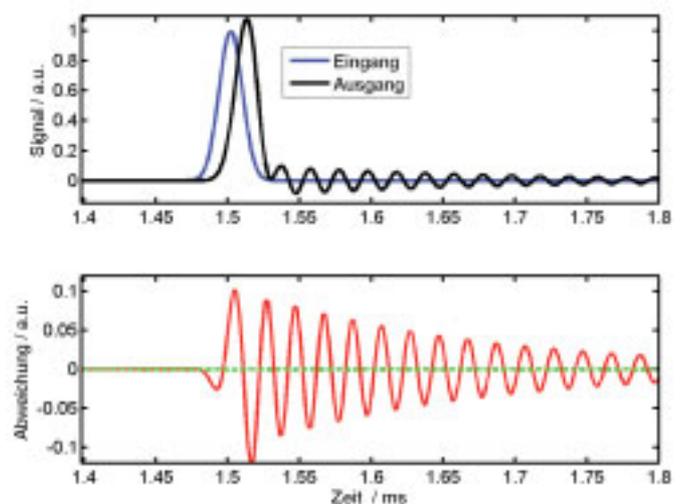


Bild 2: Ein- und Ausgangssignal eines Messsystems (oben) und die Differenz (unten) zwischen (zeitversetztem) Ausgangs- und Eingangssignal mit (grün) und ohne (rot) Einsatz eines Kompensationsfilters

verhalten, d. h. eine Identifikation des Messsystems voraus. Das digitale Filter wird dann so entworfen, dass der Frequenzgang des Messsystems durch seinen eigenen – zum Messsystem inversen – Frequenzgang ausgeglichen wird. Der Nutzen des Kompensationsfilters wird durch die in Abbildung 2 dargestellten dynamischen Ausgangssignale eines Messsystems mit und ohne Kompensation deutlich.

Die Unsicherheitsberechnung für das kompensierte Messsystem erfordert stets die Berücksichtigung der zugrunde liegenden Dynamik sowie der Unsicherheit des zur Kompensation eingesetzten Filters. Analysen im Bereich dynamischer Messungen mechanischer Größen haben gezeigt, dass „statische“ Unsicherheitsberechnungen oft nur zu unzulänglichen Ergebnissen führen.

Modellierung und numerische Simulation von Strömungsvorgängen

Eine mathematische Beschreibung der Dynamik von Flüssigkeiten ist durch die Navier-Stokes-Gleichungen gegeben, für deren Lösung numerische Verfahren wie die Methode der finiten Volumen oder die Methode der finiten Elemente in Kombination mit empirischen sogenannten Turbulenzmodellen eingesetzt werden. In Kooperation mit den Fachbereichen des Explosionsschutzes werden Simulationsrechnungen von Freistrahlen binärer Mischungen in verschiedenen Geometrien zum Vergleich mit dort durchgeführten Messungen durchgeführt (Bild 3). Im bebilderten Beispiel wird das Austreten von Brennluftstoffgemischen um einen nachempfundenen Tankauflieger herum modelliert und durch Experimente validiert (Bild 4). Das langfristige Ziel dieser Aktivitäten ist es, eine quantitative mathematische Beschreibung durch schrittweise Verbesserung und

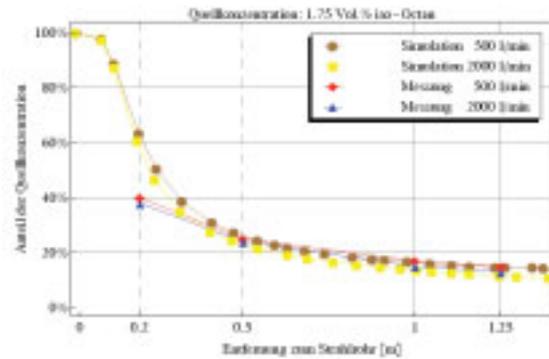


Bild 4: Konzentration von Kerosin in Abhängigkeit der Entfernung vom Strahlrohr

Validierung der Modelle mit Hilfe des Vergleiches zu Messungen zu erreichen. Gelingt dieses Vorhaben, könnten Simulationsrechnungen an geeigneten Stellen zukünftig heute noch notwendige teure Prüffexperimente ersetzen.

Biosignalanalyse von Einzelereignissen

Ein schönes Beispiel für das Zusammenspiel mathematischer und messtechnischer Expertise ist die Biosignalanalyse. In der Gehirnforschung wird einem Probanden typischerweise ein akustischer, visueller oder taktile Reiz gegeben und im Anschluss daran die neuronale Reaktion mittels EEG oder MEG gemessen. Die gesuchten Reizantworten rufen aber meist nur schwache Signale hervor, die im Rauschen der Messung untergehen.

Daher werden diese Stimulationen vielfach, mitunter 10 000fach und mehr, wiederholt, um die Messdaten durch ein Mittelungsverfahren vom Rauschen zu befreien. Dieser Vorgehensweise sind aber Grenzen gesetzt, wenn zu erwarten ist, dass ein Reiz nicht beliebig oft die gleiche Reaktion evoziert. Auch bei weitgehend automatisierten Prozessen ist mit Ermüdungserscheinungen des

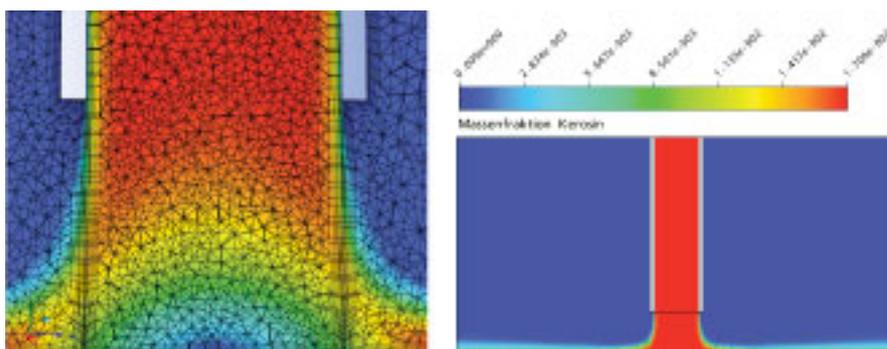


Bild 3: Hybrides Netz, bestehend aus Tetraedern und den im Übergangsbereich des Rohraustrittes angeordneten Prismenschichten (links). Massenanteil von Kerosin in einem aufprallenden Freistrahle (rechts).

Probanden zu rechnen, die die Signalform verändern (Bild 5).

Vor diesem Hintergrund werden in der Abteilung mathematisch-rechentechnische Verfahren zur Auswertung von EEG- und MEG-Daten entwickelt. Das Ziel ist, das gesuchte Nutzsignal möglichst bereits aus der einzelnen gemessenen Reizantwort herauszulesen, trotz der Überlagerung von vielen stärkeren Störsignalen.

Ein integrativer Ansatz ist die blinde Quellentrennung, die in einem Schritt versucht,

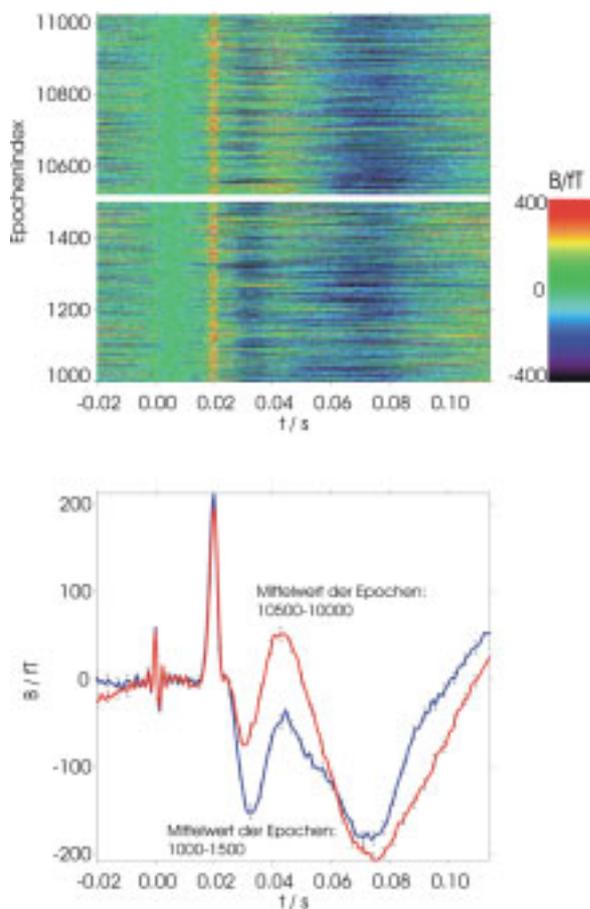


Bild 5: Einzelereignisanalyse bei einem durch elektrische Stimulation gewonnenem Gehirnsignal. a) Aufeinanderfolgende Gehirnantworten mit einem Peak bei 0,02 s nach dem Stimulus. Die Abszisse bezeichnet die Zeit, die Ordinate ist der Index der Elektropulse, und der Grauwert kodiert die Magnetfeldstärke. Jede horizontale Grauwertlinie entspricht einer einzelnen Gehirnantwort. b) Statistische Auswertung des Ensembles der Einzelantworten aus a). Bei 0,02 s ist die Antwort stabil über alle 11 000 Stimulationen, die Antwort bei 0,05 s nimmt hingegen statistisch signifikant mit der Anzahl der Stimulationen ab.

sowohl Nutz- wie auch Störsignale zu finden. Hier wird die Trennung verschiedener Signalanteile auf Grund ihrer unterschiedlichen statistischen Eigenschaften und ihrer räumlichen Struktur vorgenommen. Allerdings sind auch bei diesen Verfahren Kenntnisse über die Charakteristika von Nutz- und Störsignalen unumgänglich, um im Nachhinein die separierten Signalanteile zu identifizieren.

Mathematische Modellierung und Datenanalyse für die Gewebeoptik

Mathematische Modellierung und darauf aufbauende Methoden der Datenanalyse spielen auch eine zentrale Rolle bei nichtinvasiven quantitativen Mess- und Bildgebungsverfahren der biomedizinischen Optik. Eine wesentliche Zielrichtung dieser Verfahren besteht darin, krankhafte Gewebeveränderungen gegenüber gutartigen Veränderungen sowie gegenüber gesundem Gewebe sichtbar zu machen und zu differenzieren, um daraus einen medizinisch-diagnostischen Nutzen zu ziehen. Optische Kontrastmechanismen können die durch die Erkrankung veränderten Absorptions- und Streueigenschaften des Gewebes sein, aber auch die gegenüber gesundem Gewebe geänderte Autofluoreszenz nach optischer Anregung. Darüber hinaus wird auch die Verwendung zusätzlicher optischer Kontrastmittel vorgeschlagen.

Messtechnisch besteht bei den genannten Verfahren die Herausforderung u. a. darin, durch Einstrahlung von Licht des nahinfraroten Spektralbereiches, welches in menschlichem Gewebe die bestmögliche Eindringtiefe zeigt, sowie durch Messung des in Transmission oder diffuser Reflexion wieder aus dem Gewebe austretenden Lichtes gewebeoptische Parameter, wie Absorptions- oder Streukoeffizienten und/oder die Konzentration eines ggf. eingesetzten Kontrastmittels zu rekonstruieren. Hierfür sind Modelle für die Lichtausbreitung im Gewebe sowie geeignete Rekonstruktionsalgorithmen erforderlich, ohne die die gewünschten Messgrößen nicht bestimmt werden können. In allen praktisch relevanten Fällen handelt es sich bei diesen Rekonstruktionsverfahren um schlecht gestellte inverse Probleme, die es zu lösen gilt. Da die Lichtausbreitung im Gewebe sehr wesentlich durch die Lichtstreuung

bestimmt wird, kann sie in vielen Fällen näherungsweise durch eine Photonen-Diffusionsgleichung modelliert werden. Die Berücksichtigung inhomogenen Gewebes sowie realer und damit oft komplexer geometrischer Formen des Gewebes erfordert entweder vereinfachende Näherungen (z. B. Störungsrechnungen) oder aber numerische Verfahren wie Finite-Elemente-Methoden oder Monte-Carlo Simulationen für die Vorwärtsrechnungen.

Besonders aussichtsreich und vielversprechend für die Lösung des inversen Problems und damit auch für die Erkennung und Differenzierung von Krankheiten erscheinen derzeit Verfahren unter Verwendung fluoreszierender Kontrastmittel, um eine quantitative Bewertung von Erkrankungen zu ermöglichen. Insbesondere wird intensiv an der Entwicklung von spezifisch an bestimmte molekulare oder zelluläre Zielstrukturen bindenden Kontrastmitteln gearbeitet.

Entwicklung und Einsatz multimodaler Messmethoden in der medizinischen Diagnostik

Schwerpunkte im Bereich Magnetresonanztomographie (MRT) sind die Themenfelder Entwicklung neuer Messverfahren, Patientensicherheit und Quantifizierung von Messdaten. Aus dem Aufgabenspektrum sei ein aktuelles Beispiel herausgegriffen:

Die Atem- und Herzbewegung führt zu Bildartefakten bei der MRT. Deshalb werden in der klinischen Routine spezielle Techniken

angewandt, die diese Bildstörungen ausschließen sollen. Jede dieser Techniken (Atemanhalten, EKG-Triggerung, MR-Navigatoren, etc.) besitzt ihre besonderen Beschränkungen. Da die Herzbewegung während der Pumpaktion von Schlag zu Schlag variieren kann, ist eine Technik wünschenswert, die die eigentliche mechanische Aktion des Organs direkt und nicht über die Zwischengröße EKG verfolgt, um mit dieser Information die MR Datenerfassung zu steuern. Eine sehr attraktive Lösung scheint die Ultrabreitband-Radartechnik („UWB-Radar“, Bandbreite 1-10 GHz) zu bieten, die innerhalb des DFG-Schwerpunktprogramms „Ultrabreitband-Funktechniken für Kommunikation, Lokalisierung und Sensorik“ entwickelt wird. Hierbei nutzt man die hohe zeitliche und räumliche Auflösung der Radar-Sensoren, deren Kompatibilität zu Schmalbandsystemen sowie die geringe Leistung der Sondierungssignale einschließlich deren Fähigkeit zur Objektdurchdringung. Wird der menschliche Körper nämlich mit solchen breitbandigen elektromagnetischen Pulsen geringer Leistung ($< 1\text{mW}$) bestrahlt (Bilder 6 bis 8), so dringen diese in den Körper ein und werden an den aufeinander folgenden Grenzschichten der verschiedenen Gewebearten teilreflektiert. Mit einer Empfangsantenne werden die aus unterschiedlichen Tiefen des Körpers reflektierten Signale detektiert. Atmung und Herzschlag verschieben und verformen die Grenzschichten und beeinflussen damit das gemessene Signal. Mit Rekonstruktionsalgorithmen, die dazu entwickelt werden, sollen diese anatomischen Bewegungen aus den Messdaten ortsabhängig extrahiert und die ihnen zugrunde liegenden physiologischen Prozesse getrennt werden.

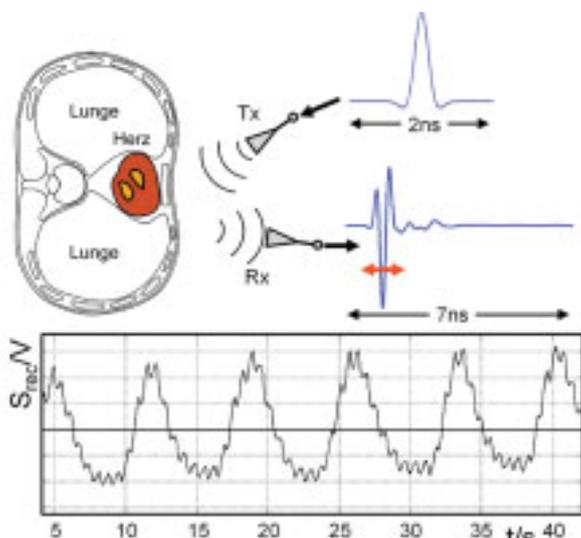


Bild 6: Untersuchung des menschlichen Körpers mit breitbandigen elektromagnetischen Pulsen. Oben: Gesendeter und empfangener, durch die Vitalfunktionen modulierter Puls. Unten: Rekonstruierte physiologische Signatur S_{rec} , Atmung mit überlagertem Herzschlag, rekonstruiert aus UWB-Radar-Daten.

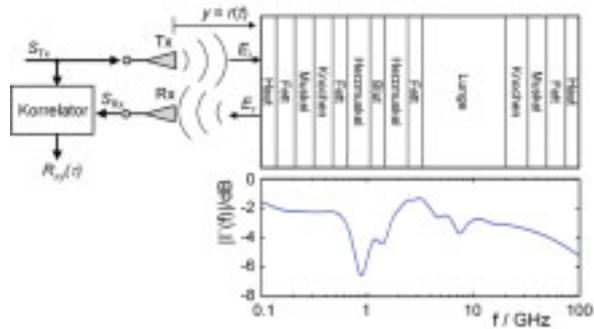


Bild 7: Untersuchung einer mehrlagigen dielektrischen Struktur mit dem UWB-Radar (bi-statische Anordnung). S_{Tx}/S_{Rx} : gesendetes/empfangenes Signal; Tx/Rx: Sende-/Empfangsantenne; E_i/E_r : einfallende/reflektierte elektrische Feldkomponente; $R_{xy}(\tau)$: Korrelations-Ergebnis aus dem UWB-Controller; $G(f)$: Reflexionskoeffizient. Oben rechts: Schichtmodell zur Beschreibung der Reflexionseigenschaften des menschlichen Thorax' (nicht maßstabsgerecht). Unten rechts: Berechnete Magnitude der Reflexionsantwort $G(f)$, die der Frequenz-Antwortfunktion des Objekts äquivalent ist.

Resümee

Sowohl im gesetzlichen Messwesen als auch in der metrologischen Grundlagenforschung nehmen informationstechnische und mathematisch/ datenanalytische Komponenten zunehmend eine bedeutende integrale Rolle ein und stellen somit eine anspruchsvolle Herausforderung für die Metrologie dar. Ohne eine intensive Einbeziehung und eine mittelfristige deutliche Verstärkung dieser Expertisen wäre die Metrologie nicht für die Zukunft gerüstet.

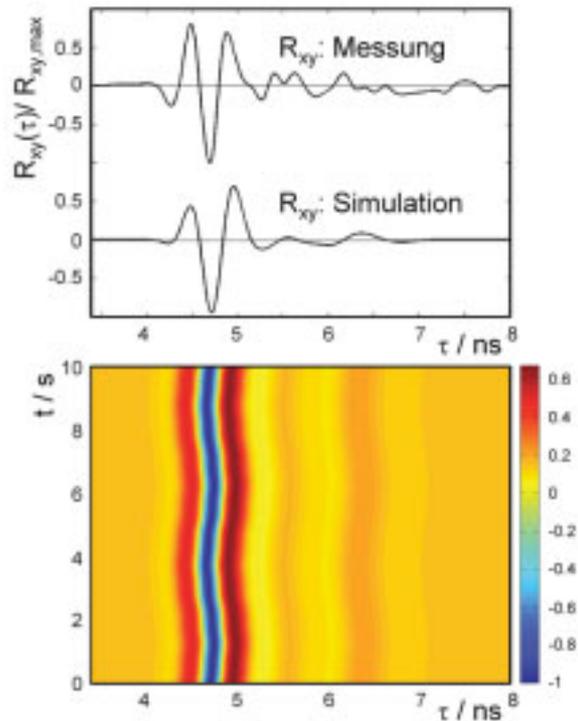


Bild 8: Oben: Vergleich der normierten gemessenen und simulierten Korrelationsergebnisse $R_{xy}(\tau)$ des menschlichen Körperphantoms. Unten: simulierter Zeitverlauf von $R_{xy}(\tau, \tau)$ während zweier Atemzyklen. Der Atmung mit einer Amplitude von 10 mm und einer Frequenz von 0,2 Hz ist eine durch den Herzschlag verursachte Bewegung der Thoraxoberfläche mit 1 mm Hub und einer Frequenz von 1 Hz überlagert. Die Lage der Lungenschicht variiert dabei um 10 mm. Die Dicke der Blutschicht innerhalb des Herzens erfährt durch die gegenläufige Bewegung der beiden Herzmuskelschichten eine Modulation von 10 mm.

In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

(diese und weitere Nachrichten ausführlich im Web-Jahresbericht unter www.ptb.de)

Grundlagen der Metrologie

Bestimmung von Messunsicherheiten für dynamische Messungen

Der „Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM)“ regelt die Bestimmung von Messunsicherheiten in der Metrologie. Für zeitabhängige Messgrößen, wie sie etwa bei dynamischen Messungen mechanischer Größen auftreten, lässt sich der GUM aber nicht ohne weiteres anwenden. Daher wurde mit der Erweiterung der Methoden des GUM für dynamische Messungen begonnen. Auf Basis eines Bayes'schen Ansatzes konnten Methoden zur Unsicherheitsberechnung erfolgreich für den Fall entwickelt werden, dass sich die Dynamik durch ein lineares, zeitlich-invariantes System modellieren lässt. (C. Elster, FB 4.2, clemens.elster@ptb.de; A. Link, FB 8.4, alfred.link@ptb.de)

Evaluierung eines neuen Kalibrierverfahrens für Vektornetzwerkanalysatoren

In Zusammenarbeit mit der PTB Arbeitsgruppe 2.22 *Hochfrequenzmesstechnik* wurde ein neues, mathematikgestütztes Verfahren zur hochgenauen Kalibrierung von Vektornetzwerkanalysatoren (VNA) evaluiert. Die Evaluierung wurde durch den experimentellen Vergleich mit einer aufwendigen, etablierten Referenzmethode durchgeführt. Als Ergebnis konnte das neue Verfahren bestätigt werden. Dieses ermöglicht nun in einfacher Weise die hochgenaue Kalibrierung von VNAs sowie die Funktionsprüfung mechanischer Kalibriersätze und elektronischer Kalibriereinheiten. (G. Wübbeler, FB 8.4, gerd.wuebbeler@ptb.de, C. Elster, FB 8.4, clemens.elster@ptb.de; R. Judaschke, FB 2.2, rolf.judaschke@ptb.de)

Ein praxisnaher Rahmen für die Entwicklung und Bewertung metrologischer Software

Die Verbesserungen der Qualität metrologischer Software und die Reduzierung der Kosten ihrer Entwicklung und Bewertung sind unerlässlich für eine zukunftstaugliche Metrologie. Aufgrund der zunehmenden Komplexität von Software und der wachsenden Abhängigkeit metrologischer Anwendungen von Software wachsen die Bedenken in Bezug auf die Qualität der Software. Momentan existiert keine umfassende internationale Richtlinie, die auf einheitliche Weise von Metrologen und Praktikern der Messtechnik benutzt werden kann.

Aus diesem Grund haben PTB und NPL begonnen, gemeinsam eine praxisnahe Richtlinie für die Entwicklung und Bewertung metrologischer Software zu erarbeiten, mit dem Ziel, diese als internationale Richtlinie zu etablieren. (N. Greif, FB 8.5, norbert.greif@ptb.de)

Enzyme Linked Immunosorbent Assay (ELISA) validiert

Einer der wichtigsten immunologischen Verfahren zum sensitiven und quantitativen Nachweis biologisch relevanter Moleküle ist der Enzyme Linked Immunosorbent Assay (ELISA). Wegen der weiten Verbreitung ist die Frage nach Messunsicherheiten bei der Konzentrationsbestimmung von Biomolekülen mittels ELISA von großem Interesse. Für die Gewinnung quantitativer Resultate ist neben der Standardisierung der Komponenten auch eine Kalibrierung der Vielzahl auf dem Markt befindlichen Geräte nötig, um so die Messunsicherheit und damit die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu verbessern. Im Rahmen einer CCQM-Studie (CCQM-Comité consultatif pour la quantité de matière – métrologie en chimie) hat die PTB erfolgreich an internationalen Vergleichsmessungen eines ELISA zur Zytokinbestimmung (humanes Interferon- α) teilgenommen. (J. Voigt, FB 8.3, jan.voigt@ptb.de)

EMRP-Projekt „Metrologie auf zellulärer Ebene für die regenerative Medizin“

Um Anforderungen für die Qualitätssicherung bei der Herstellung künstlicher Gewebe festzulegen, wurden die im Rahmen des EMRP (European Metrology Research Programme) geförderten Arbeiten zur regenerativen Medizin aufgenommen. Die PTB betreibt Entwicklung durchflusszytometrischer Verfahren zur Vorselektion von z. B. endothelialen Stammzellen durch Zellsortierung und mikroskopischer Verfahren zur Kontrolle des Zellwachstums auf ausgewählten Oberflächen und Gewebegerüsten. Dem Verbundprojekt gehören weiterhin Arbeitsgruppen des National Physical Laboratory (NPL, UK), des Laboratory for Government Chemists (LGC, Großbritannien), des Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica (INRIM, Italien), der Universität Turin (Italien) und der Helsinki University of Technology (TKK, Finland) an. (J. Neukammer, FB 8.3, joerg.neukammer@ptb.de; R. Macdonald, FB 8.3, rainer.macdonald@ptb.de)

Magnetische Abschirmung für ehrgeiziges Neutronenexperiment

Am Institut Laue-Langevin in Grenoble untersucht ein Konsortium europäischer Forscher, ob Neutronen ein elektrisches Dipolmoment haben. Das elektrische Dipolmoment des Neutrons wäre ein Maß dafür, wie stark sich Materie und Antimaterie in ihren physikalischen Eigenschaften voneinander unterscheiden. Bei diesen Experimenten wird das Verhalten von ultrakalten Neutronen in elektrischen Feldern untersucht. Um die Messgenauigkeit zu erhöhen, soll die Wechselwirkung des magnetischen Moments des Neutrons mit magnetischen Feldern minimiert werden. Für Konstruktion, Test und Aufbau einer magnetischen Schirmung des Neutronenexperiments soll die Expertise genutzt werden, die die PTB beim Aufbau des weltbesten magnetischen Abschirmraums BMSR-2 erwerben konnte. (A. Schnabel, FB 8.2, allard.schnabel@ptb.de)

Metrologie für die Wirtschaft

Erarbeitung referenzfreier Geradheitsmessverfahren

Im Rahmen des BMBF-Verbundvorhabens „CDuR32“ wurden in der PTB Arbeiten zur Entwicklung neuer, referenzfreier Geradheitsmessverfahren aufgenommen. Ziel dieser Forschung ist es, die mit dem PTB-Nanometerkomparator mögliche Längenmessungen dahingehend zu erweitern, dass eine simultane Geradheitsmessung mit Unsicherheiten im Nanometerbereich ermöglicht wird. Das Verfahren beruht auf scannenden interferometrischen Messungen und der mathematischen Modellierung sowohl von systematischen Abweichungen der Interferometermessungen als auch von Einflüssen einer nicht perfekten Führung. (M. Stavridis, FB 8.4, manuel.stavridis@ptb.de; A. Wiegmann, FB 8.4, axel.wiegmann@ptb.de; C. Elster, FB 8.4, clemens.elster@ptb.de; M. Schulz, FB 4.2, michael.schulz@ptb.de; J. Flügge, FB 5.2, jens.flügge@ptb.de)

Neues BMBF-Vorhaben zur Entwicklung von inversen Methoden und Auswerteverfahren für Scatterometrie und Reflektometrie

Im Rahmen einer Kooperation mit dem Weierstrass-Institut in Berlin hat die PTB Forschungsarbeiten begonnen, deren Ziel ein auf inversen Methoden beruhendes mathematisches Auswerteverfahren für indirekte scattero- und reflektometrische Messungen an Photomasken ist. Schwerpunkte dieses Projektes sind die Erweiterung existierender Auswerteverfahren von zwei- auf dreidimensionale Strukturen, die Verfeinerung von Strukturmodellen der verwendeten Masken, insbesondere unter Berücksichtigung von Rauheit, und die Optimierung der Messbedingungen. Die Arbeiten sind Teil des neuen BMBF-Verbundvorhabens „Critical-Dimension- und Registration-Technologien für die 32-Nanometer-Maskenlithographie (CDuR32)“. (H. Groß, FB 8.4, hermann.groß@ptb.de; M. A. Henn, FB 8.4, mark-alexander.henn@ptb.de, R. Model, FB 8.4, regine.model@ptb.de, M. Bär, FB 8.4, markus.baer@ptb.de, B. Bodermann, FB 4.2, bernd.bodermann@ptb.de, Frank Scholze, FB 7.1, Frank.Scholze@ptb.de)

Integrierte Sicherheitslösung für Kassensysteme

Auf der Grundlage eines früher in der PTB entstandenen Konzepts wird im Rahmen eines neu begonnenen MNPQ-Projekts gemeinsam mit Partnern aus der Industrie eine Sicherheitslösung für Kassensysteme mit dem Ziel entwickelt, Daten fälschungssicher zu erfassen und zu speichern. Die Mess- und Abrechnungsdaten sowie Managementinformationen und Fiskaldaten werden mit kryptographischen Verfahren gegen Verfälschungen und Manipulationen geschützt. Es werden Prototypen eines Sicherheitsmoduls entwickelt, das nach erfolgreicher Erprobung in Kassensysteme integriert werden soll. (N. Zisky, FB 8.5, norbert.zisky@ptb.de)

Neues Kommunikationskonzept für Bundeswehrtankstellen

In Zusammenarbeit der PTB mit dem BMVg und dem Staatlichen Hochbauamt Weser-Leine (POL) wurde ein Kommunikationskonzept zur Vernetzung aller Bundeswehrtankstellen erarbeitet. Nach Umsetzung des Konzepts sollen alle Bundeswehrtankstellen nach einem einheitlichen Verfahren betrieben und die Daten von zentraler Stelle in das Verwaltungssystem übertragen werden. (N. Zisky, FB 8.5, norbert.zisky@ptb.de)

Zulassung eines verteilten Messsystems für Gas

Die überregionalen Gasverteilnetze gehören einigen wenigen Betreibern, die das Gas von Erzeugern oder aus anderen Netzen erhalten und an kleinere Netzbetreiber (z. B. Stadtwerke) weitergeben. In Übergabe- bzw. Übernahmestationen zwischen Netzbetreibern befinden sich aufwendige Messsysteme, die zum Teil eichpflichtig sind. Wegen der großen Entfernungen zwischen Messstationen und den Zentralen werden die Messwerte schon seit langer Zeit fernausgelesen. Mit der Liberalisierung des Energiemarktes hat die Sicherung der Datenübertragung und -speicherung der Messwerte einen höheren Stellenwert bekommen. Beim Gasversorger Verbundnetz Gas wurde nun erstmals ein mit der vorhandenen Infrastruktur kompatibles Datenübertragungssystem mit hohem Sicherheitsniveau auf der Basis des WELMEC-Leitfadens 7.2 „Software“ bzw. der PTB-A 50.7 zugelassen. (U. Grottker, FB 8.5, ulrich.grottker@ptb.de)

Neue dynamische Messverfahren für die Industrie

Im August 2008 wurde das vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) geförderte Projekt „Modellgestützte Kalibrierung von Beschleunigungsaufnehmern“ erfolgreich abgeschlossen. Die Förderung erfolgte im Rahmen des MNPQ-Transfer-Programms des BMWi, mit dem der Technologietransfer von innovativen Messverfahren in kleinere und mittlere Unternehmen unterstützt wird. Das Projekt wurde gemeinsam mit der Firma SPEKTRA Schwingungstechnik und Akustik GmbH Dresden durchgeführt. Die Integration der neuen Methoden in die Messeinrichtungen von SPEKTRA wurde erfolgreich abgeschlossen und die neuen Verfahren werden nun von SPEKTRA weltweit angeboten. (F. Schmähling, FB 8.4, franko.schmaehling@ptb.de; A. Link, FB 8.4, alfred.link@ptb.de; C. Elster, clemens.elster@ptb.de, FB 8.4; T. Bruns, FB 1.3, thomas.bruns@ptb.de)

Erfolgreicher Beginn einer klinischen Studie zum frühen fluoreszenzgestützten Nachweis rheumatischer Erkrankungen

Im Rahmen eines von der Investitionsbank Berlin (IBB) geförderten und mit EU-Mitteln kofinanzierten Anschlussprojektes zur Früherkennung von Rheuma werden in Kooperation mit der mivenion GmbH, den Helios Kliniken und der FU Berlin neue optische Kontrastmittel entwickelt und physikalisch charakterisiert sowie eine klinische Studie durchgeführt. Dem von der PTB zur Durchführung der klinischen Studie entwickelten Zwei-Hand-Imager wurde von einer benannten Stelle die technische Unbedenklichkeit nach dem Medizinproduktegesetz bescheinigt. Die Lizenzierung des Verfahrens wird betrieben (PCT Anmeldung: WO2007000349). (B. Ebert, FB 8.3, bernd.ebert@ptb.de; R. Macdonald, FB 8.3, rainer.macdonald@ptb.de)

Metrologie für die Gesellschaft

Kombination von Nahinfrarotspektroskopie und funktioneller Kernspintomographie: auf dem Weg zur Quantifizierung der neurovaskulären Kopplung

Nahinfrarot-Spektroskopie (NIRS) und funktionelle Kernspintomographie (fMRI) sind zwei etablierte Methoden in der Hirnforschung, die sich mit unterschiedlichen physikalischen Mitteln denselben physiologischen Effekt zunutze machen. Die Kombination beider Methoden in einem simultanen Experiment bietet die Möglichkeit, die gute Ortsauflösung der MRT mit der physiologischen Empfindlichkeit des optischen Nachweises zu vereinen. In einer Zusammenarbeit von Wissenschaftlern der PTB sowie der Harvard Medical School wurde die Lichtausbreitung im Kopf eines Probanden gemessen und anhand von Monte-Carlo-Simulationen auf der Grundlage anatomischer und funktioneller MR-Daten nachvollzogen. (E. Kirilina, FB 8.1, evgeniya.kirilina@ptb.de; H. Wabnitz, FB 8.3, heidrun.wabnitz@ptb.de)

Tier-MRT in Betrieb genommen

Im neuen Laborgebäude für Ultrahochfeld-Magnetresonanztomographie auf dem Campus des Max-Delbrück-Centrum für Molekulare Medizin in Berlin-Buch wurde jetzt das erste große Forschungsgerät in Betrieb genommen. Es handelt sich um einen hochempfindlichen MRT-Scanner für Kleintiere, der bei einem Grundfeld von 9,4 Tesla arbeitet. Das Instrument wurde primär für die biomedizinische Grundlagenforschung beschafft, wird aber auch PTB-Forschern für ihre messtechnischen Entwicklungen zur Verfügung stehen. (B. Ittermann, FB 8.1, bernd.ittermann@ptb.de)

„Hyper-CEST“-Nachweis von ^{129}Xe in funktionalisierten Biosensoren

Wissenschaftler aus dem Leibniz-Institut für Molekulare Pharmakologie, Berlin, dem Max-Delbrück-Centrum für Molekulare Medizin, Berlin, und der PTB haben gemeinsam einen funktionalisierten Biosensor, bestehend aus einem Cryptophane-Käfigmolekül, einem Linker und einem Bindungspeptid, entwickelt. Mit NMR-Spektroskopie an hyperpolarisierten Xenon-Atomen innerhalb des molekularen Käfigs wurde die Ligandenbindung des für das menschliche Immunsystem zentralen Proteins MHC Typ-II (Haupthistokompatibilitätskomplex) nachgewiesen. Durch Anwendung der „Hyper-CEST“-Methode, die aufgrund des schnellen Wechsels der Xenonatome zwischen Käfig und Umgebung (Lösung) eine hohe Signalverstärkung bewirkt, konnten Konzentrationen bis hinab zu $5\ \mu\text{mol}$ detektiert werden. (W. Kilian, FB 8.1, wolfgang.kilian@ptb.de; L. Mitschang, FB 8.1, lorenz.mitschang@ptb.de)

Entwicklung von elektrophysiologischen Diagnoseverfahren mittels Magnetencephalographie am Beispiel der Borderline-Persönlichkeitsstörung

Die sog. Borderline Persönlichkeitsstörung ist für die Patienten sehr belastend und verursacht hohe volkswirtschaftliche Kosten. Deswegen ist es ein Ziel der aktuellen Gehirnforschung die bisher allein auf Befragung und Beobachtung der Patienten beruhende psychiatrische Diagnose durch elektrophysiologische Ergebnisse zu ergänzen. In diesem Rahmen wird zusammen mit der Psychiatrischen Klinik der Charite eine Magnetencephalographie (MEG)-Studie zur Verarbeitung von emotional geladenen Gesichtsausdrücken bei Borderline-Patienten durchgeführt. In einer erste Messreihe an 13 Patienten und 11 gesunden Kontrollprobanden wurden signifikante Unterschiede in den Hirnreaktionen der Patienten- und der Kontrollgruppe beobachtet. (T. Sander, FB 8.2, tilmann.sander-thoemmes@ptb.de)

Seitenvergleich der DC-MEG-Signale bei Patienten mit subakutem Schlaganfall

Die beim Schlaganfall sichtbaren strukturellen Veränderungen sind begleitet von langsamen zellphysiologischen Prozessen, die sich bisher einer nichtinvasiven Charakterisierung entziehen. Zusammen mit der neurologischen Klinik der Charite wird untersucht, ob die mit Fingerbewegungen verbundenen Hirnströme diese Prozesse widerspiegeln. Dabei wird die früher bei Gesunden erprobte DC-MEG-Technik (Gleichsignal-Magnetenzephalographie) eingesetzt, die diese langsam veränderlichen Hirnströme messen kann. In einer Pilotstudie wurde beobachtet, dass bei einigen Patienten die DC-MEG-Signale auf der vom Schlaganfall betroffenen Seite eine deutlich schwächere Amplitude haben als auf der „gesunden“ Seite. (T. Sander, FB 8.2, tilmann.sander-thoemmes@ptb.de)

EU Projekt MEGMRI

Unter der Leitung der Technischen Universität Helsinki begann im Mai 2008 ein EU-Projekt mit insgesamt 13 Partnern, das sich das Ziel gesetzt hat, ein Gerät zu entwickeln, das sowohl die Hirnfunktion mittels Magnetenzephalographie als auch die Anatomie mittels Niedrigfeld-Magnetresonanz-Bildgebung messen kann. Die PTB steuert in diesem Verbund ihre Expertise auf dem Gebiet des MEG und der Magnetresonanz mit SQUID-Magnetfeldsensoren bei. (M. Burghoff, FB 8.2, martin.burghoff@ptb.de)

Die Wirkung von siRNA im Tiermodell nachgewiesen

Gemeinsam mit der Robert-Roessle-Klinik und dem Max-Delbrück-Centrum für Molekulare Medizin wurde siRNA (small interfering ribonucleic acid) zur Abschaltung (Silencing) der Ferrochelatase (FECH) untersucht. Mit einem speziell für diese Aufgabe entwickelten abbildendem System unter Verwendung einer gepulsten LED zur Anregung und einer emCCD-Kamera zum Nachweis der Fluoreszenz konnte nachgewiesen werden, dass vorher applizierte siRNA die Bildung von Häm aus Protoporphyrin IX (PpIX) in Tumorzellen unterdrückt und damit die Konzentration des PpIX erhöht. Der Nachweis, dass dieses Verfahren, das bisher nur auf zellulärer Ebene erfolgreich war, auch in vivo funktioniert, eröffnet die Möglichkeit, Tumoren mit Hilfe des natürlichen Zellfarbstoffs PpIX zu markieren sowie durch Licht geeigneter Wellenlänge zu zerstören. (B. Ebert, FB 8.3, bernd.ebert@ptb.de)

Zeitaufgelöste optische Bildgebung des Gehirns – ein europäisches Verbundforschungsprojekt

In diesem Jahr begann das europäische Verbundprojekt „Nicht-invasive Bildgebung von Hirnfunktion und -Erkrankung mittels gepulsten Nahinfrarotlichtes“ (2008-2012) im Rahmen des 7. Rahmenprogramms. Es strebt wesentliche Entwicklungen in Technik und Datenanalyse an, die die zeitaufgelöste diffuse optische Bildgebung hinsichtlich räumlicher Auflösung, Empfindlichkeit, Robustheit der Quantifizierung sowie Leistungsfähigkeit entsprechender Geräte für die klinische Diagnostik und Überwachung verbessern sollen. Der Beitrag der PTB konzentriert sich auf instrumentelle Entwicklungen, Leistungsbewertung und Qualitätskontrolle sowie klinische Pilotstudien. (H. Wabnitz, FB 8.3, heidrun.wabnitz@ptb.de)

Nationaler Standard zur durchflusszytometrischen Referenzwertermittlung der Konzentration von Blutplättchen

Der Arbeitsausschuss „Hämatologie“ im Normenausschuss Medizin des DIN hat unter Federführung der PTB die Norm 58932-5, in der ein Verfahren zur Referenzwertbestimmung der Konzentration der Thrombozyten beschrieben ist, fertiggestellt. Für die Identifikation der Blutplättchen sind – wie in der Norm angegeben – immunologische Markierungen erforderlich. Zurzeit wird das Referenzverfahren in der PTB erprobt, um die Anforderungen an Kontrollblute für Ringversuche zur Thrombozytenzählung festzulegen. (J. Neukammer, FB 8.3, joerg.neukammer@ptb.de; S. Schädel, FB 8.3, sandra.schaedel@ptb.de)

Nachweis von T-Helfer-Zellen in mikrofluidischen Durchflusszytometern

Die in einem von der Investitionsbank Berlin (IBB) geförderten und von der EU kofinanzierten Projekt weiterentwickelten Mikro-Durchflusszytometer konnten T-Helfer-Zellen nachgewiesen werden. Die aufgenommenen zweidimensionalen Fluoreszenzstreudiagramme entsprechen den bei Vergleichsmessungen mit kommerziellen Durchflusszytometern erhaltenen Streudiagrammen. Die Ergebnisse zeigen, dass durch die Weiterentwicklung die mikrofluidischen Strukturen zur Zelldifferenzierung inzwischen ähnliche Empfindlichkeiten aufweisen wie konventionelle Laser-Durchflusszytometer. (M. Frankowski, FB 8.3, marcin.frankowski@ptb.de; A. Kummrow, FB 8.3, andreas.kummrow@ptb.de; S. Schädel, FB 8.3, sandra.schaedel@ptb.de; J. Neukammer, FB 8.3, joerg.neukammer@ptb.de)

Strömungssimulation zur Explosionsprävention an Tankwagen

Mit Simulationsrechnungen wurden im Vergleich mit Messungen das Austreten von Brennluftstoffgemischen um einen experimentell nachempfundenen Tankauflieger herum modelliert. Die Untersuchungen dienten der zuverlässigen Bestimmung explosionsgefährdeter Bereiche an Tankwagen. Ein Vergleich Simulation – Messdaten zeigte eine gute Übereinstimmung. Für die Beschreibung der Turbulenz wurde das SST (Shear Stress Transport)-Modell, eine Kombination der Zweigleichungsmodelle k- ϵ und k- ω , eingesetzt. (G. Lindner, gert.lindner@ptb.de, FB 8.4; R. Model, FB 8.4, regine.model@ptb.de; H. Förster, FB 3.4, hans.foerster@ptb.de)

Quantifizierung magnetischer Nanopartikel in der Krebstherapie

Magnetische Nanopartikel werden zunehmend in der Medizin eingesetzt, beispielsweise als Träger von Wirkstoffen in der Krebstherapie. Zur Optimierung der Therapie sind quantitative Daten über die Anreicherung der magnetischen Nanopartikel im Tumor hilfreich. Diese können durch eine Messung ihres Magnetfelds ermittelt werden, indem die Messdaten über ein aufwendiges Iterationsverfahren an das Feld eines magnetischen Dipols angepasst werden. Zur Vereinfachung der Auswertung wurde ein neuartiges Verfahren entwickelt, das eine Bestimmung dieser Parameter unmittelbar aus den Eigenschaften des magnetischen Dipolfeldes gestattet und damit wesentlich stabiler und zuverlässiger ist. (W. Haberkorn, wolfgang.haberkorn@ptb.de, FB 8.4, F. Wiekhorst, frank.wiekhorst@ptb.de FB 8.2)

Internationale Zusammenarbeit

Internationales Seminar „Software in Legal Metrology“

Auf Anregung des argentinischen Staatsamtes INTI fand im August 2008 ein internationales Informations- und Fortbildungseminar mit dem Titel „Software in Legal Metrology“ unter dem Dach des SIM (Sistema Interamericano de Metrologia) statt. Das Seminar wurde überwiegend von der PTB für über 120 Teilnehmer aus der Industrie und aus metrologischen Instituten lateinamerikanischer Länder gestaltet. Inhaltliche Schwerpunkte waren die softwarebezogenen europäischen Leitfäden sowie Konzepte zur Sicherung von Messdaten.

Im Mittelpunkt standen insbesondere die Risikobewertung nach WELMEC-Leitfaden 7.2 bei den unterschiedlichen Messgerätearten und deren Anwendungsbereiche.

(U. Grottker, FB 8.5, ulrich.grottker@ptb.de;
N. Zisky, FB 8.5, norbert.zisky@ptb.de)

Der Deutsche Kalibrierdienst

In Deutschland ist die PTB zentraler Ansprechpartner für die Industrie in Fragen der Messtechnik. Die Weitergabe der Einheiten wird durch die Akkreditierungen des Deutschen Kalibrierdienstes (DKD) größtenteils auf die Ebene der industriellen Messtechnik verlagert. Die 414 DKD-Kalibrierlaboratorien werden durch die DKD-Akkreditierungsstelle kompetent überwacht und in nationalen und internationalen Gremien vertreten.

DKD-Kalibrierscheine gewährleisten den Nachweis für die messtechnische Rückführung auf nationale oder internationale Normale.

Vor dem Hintergrund der Globalisierung und der stark exportorientierten deutschen Wirtschaft muss die weltweite Anerkennung der DKD-Kalibrierscheine gewährleistet sein. Hierzu ist die Mitgliedschaft und Anerkennung in der EA (European co-operation for Accreditation) und der ILAC (International Laboratory Accreditation Cooperation) notwendig.

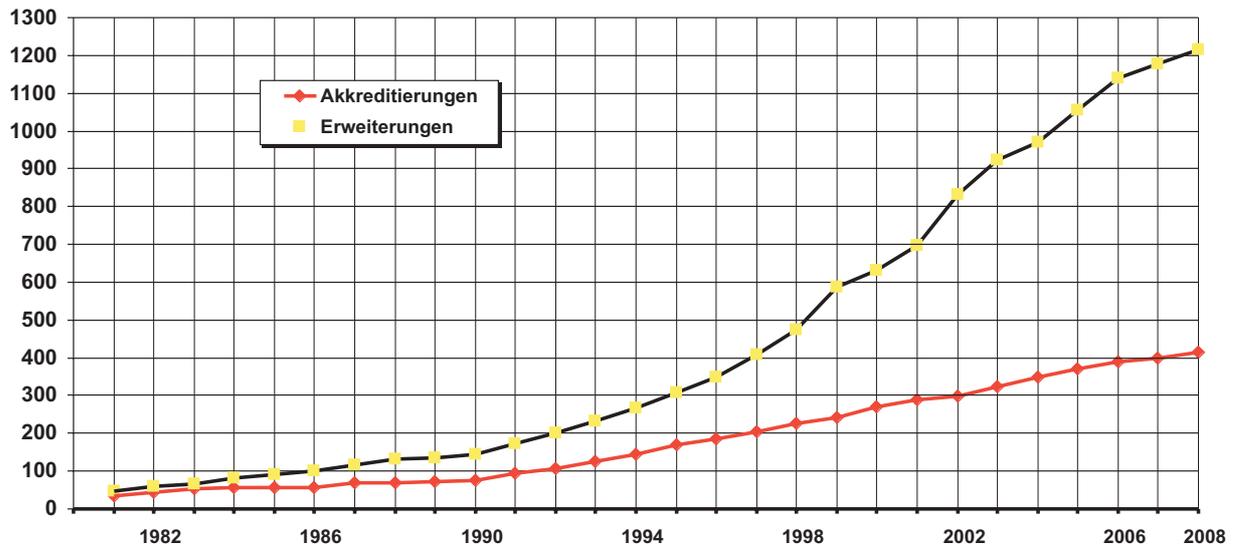
Das DKD-System ist mit derzeit etwa 380 akkreditierten Kalibrierlaboratorien in Deutschland ein wesentlicher Bestandteil des Technologietransfers auf dem Gebiet der Metrologie.

Im Ausland sind derzeit über 40 Laboratorien (z. T. Staatsinstitute) durch den DKD akkreditiert. Durch die zunehmende Zahl von Auslandsanfragen und der verstärkten Notwendigkeit der Ressourcenschonung wurde die Auslandsstrategie des DKD verändert. Es werden hauptsächlich noch Anträge aus Staatsinstituten angenommen, sofern keine anerkannte nationale Akkreditierungsstelle im jeweiligen Land vorhanden ist. Als eine

Ausnahme gelten Tochterunternehmen von DKD-akkreditierten deutschen Firmen.

Ende 2006 wurde dem DKD als zusätzliche Aufgabe die Akkreditierung und Überwachung von benannten Stellen nach der europäischen Messgeräte-richtlinie (MID) übertragen, sodass der DKD nun auch im gesetzlich geregelten Bereich arbeitet. Zwar wird die Zahl der Benennungen deutlich unter dem Umfang der staatlich anerkannten Prüfstellen bleiben, aber diese zusätzliche Fachaufgabe bedeutet eine erhebliche Erweiterung des bisherigen Arbeitsgebietes „Akkreditierung von Kalibrierlaboratorien“. Zukünftig werden die benannten Stellen durch den DKD nach den einschlägigen Normen für Prüflaboratorien, Inspektionsstellen und Zertifizierungsstellen begutachtet. Zusätzliche Voraussetzung nach der MID ist allerdings die Einhaltung verschiedener Unabhängigkeitskriterien, die in den bisherigen Prüfstellen erhebliche organisatorische Maßnahmen nach sich ziehen.

Nach der europäischen VERORDNUNG (EG) Nr. 765/2008 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 9. Juli 2008 über die Vorschriften für die Akkreditierung und Marktüberwachung im Zusammenhang mit der Vermarktung von Produkten ist die Akkreditierung als eine hoheitliche Aufgabe festgeschrieben und es darf jeweils nur noch eine Akkreditierungsstelle je Mitgliedsland geben. Dies wird erhebliche Rückwirkungen auf das deutsche Akkreditierungssystem haben. Der Abstimmungsprozess für die Errichtung einer deutschen Akkreditierungsstelle ab 1. Januar 2010 läuft auf ministerieller Ebene.



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 23 Neuakkreditierungen im Berichtsjahr, denen sieben Rücknahmen der Akkreditierungen, meistens durch Firmenzusammenschlüsse, gegenüberstehen.

Kuratorium

Mitglieder

Präsident des Kuratoriums

Ministerialdirektor Jürgen Meyer

Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, Berlin

Stellvertretender Präsident des Kuratoriums

Prof. Dr. h. c. Dr. rer. nat. Klaus von Klitzing

Direktor am Max-Planck-Institut für Festkörperforschung, Stuttgart

Dr.-Ing. Axel Anderlohr

Geschäftsführer TÜV Pfalz GmbH, Kaiserslautern

Prof. Dr. rer. nat. Gisela Anton

Physikalisches Institut IV der Universität Erlangen

Prof. Dr.-Ing. habil. Monika Auweter-Kurtz

Präsidentin der Universität Hamburg

Prof. Dr. Christian Paul Beckervordersandforth

Direktor E.ON Ruhrgas AG

Prof. Dr.-Ing. Winfried Büttner

Leiter Corporate Intellectual Property and Functions in der Zentralabteilung/Corporate Technology
Siemens AG, München

Dr. rer. nat. Markus Gerhard Dilger

Leiter Corporate Research
Carl Zeiss, Oberkochen

Prof. Dr. rer. nat. Olaf Dössel

Institut für Biomedizinische Technik
Universität Karlsruhe

Prof. Dr. Wolfgang Ertmer

Institut für Quantenoptik
Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover

Dr. Petra Gowik

Komm. Leiterin der Referatsgruppe „Untersuchungen“

Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit, Berlin

Prof. Dr. Theodor W. Hänsch

Max-Planck-Institut für Quantenoptik, Garching und Ludwig-Maximilians-Universität, München

Prof. Dr. Axel Haase

Präsident der Julius-Maximilian Universität, Würzburg

Prof. Dr. Klaus-Peter Jäckel

BASF SE, Ludwigshafen

Prof. Dr.-Ing. habil. Wolfgang Kowalsky

Leiter des Instituts für Hochfrequenztechnik
Technische Universität Braunschweig

Dipl. Phys. Veronica Martens

Leiterin des Metrologiezentrums
Sartorius AG

Prof. Dr. rer. nat. Jügen Mlynek

Präsident der Helmholtz-Gemeinschaft, Berlin

Prof. Dr.-Ing. Joachim Scheuren

Geschäftsführer der Müller-BBM GmbH, Planegg

Prof. Dr. Hans Schuler

Vice President Engineering Service,
BASF SE, Ludwigshafen

Dr. rer. nat. Wolfgang Schwitz

Direktor des Bundesamtes für Metrologie
Bern-Wabern (Schweiz)

Dr. rer. nat. Thomas Sesselmann

Geschäftsführer
Dr. Johannes Heidenhain GmbH, Traunreut

Dr. rer. nat. Augustin Siegel

Leiter Forschung und Technologie
Carl Zeiss, Oberkochen

Prof. Dr. rer. nat. Dipl.-Chem. Lothar Siekmann

Institut für Klinische Biochemie, Universität Bonn

Ind.-Kfm. Peter von Siemens

Mitglied des Aufsichtsrats
Siemens AG, München

Prof. Dr. h. c. Dr. rer. nat. Joachim Treusch

Präsident der Jacobs Universität Bremen gGmbH

Prof. e. h. Dr. rer. nat. Martin Winterkorn

Vorstandsvorsitzender der Volkswagen AG,
Wolfsburg

Dr.-Ing. Klaus Rudolf Wurster

Geschäftsführer
National Rejectors Inc. GmbH, Buxtehude

Ehrenkurator

Prof. Dr. h. c. mult. Dr. rer. nat. Heinz-Georg Wagner

Institut für Physikalische Chemie
Universität Göttingen



Präsidium		
Präsident	Vizepräsident	Mitglied des Präsidiums
Prof. Dr. E. O. Göbel ☎ 1000	Prof. Dr. M. Peters ☎ 2000	Prof. Dr. M. Kühne ☎ 3000

**Abteilung 1
Mechanik und Akustik**

Dr. R. Schwartz
☎ 1010

**Abteilung 2
Elektrizität**

Dr. H. Bachmair
☎ 2010

**Abteilung 3
Chemische Physik u.
Explosionsschutz**

Prof. Dr. K.-D. Sommer
☎ 3010

**Abteilung 4
Optik**

Dr. F. Riehle
☎ 4010

**Abteilung 5
Fertigungsmesstechnik**

Dr. G. Wilkening
☎ 5010

**Fachbereich 1.1
Masse**

Dr. P. Zervos
☎ 1100

**Fachbereich 1.2
Festkörpermechanik**

Dr. R. Kumme
☎ 1200

**Fachbereich 1.3
Kinematik**

Dr. F. M. Jäger
☎ 1300

**Fachbereich 1.4
Gase**

Dr. H. Többen
☎ 1400

**Fachbereich 1.5
Flüssigkeiten**

Dr. G. Wendt
☎ 1500

**Fachbereich 1.6
Schall**

Dr. C. Koch
☎ 1600

**Fachbereich 1.7
Angewandte Akustik**

Prof. Dr. W. Scholl
☎ 1700

**Fachbereich 2.1
Gleichstrom und
Niederfrequenz**

Dr. J. Melcher
☎ 2100

**Fachbereich 2.2
Hochfrequenz und
Felder**

Dr. T. Schrader
☎ 2200

**Fachbereich 2.3
Elektrische
Energiesmesstechnik**

Dr. M. Kahmann
☎ 2300

**Fachbereich 2.4
Quantenelektronik**

Dr. A. Zorin
☎ 2400

**Fachbereich 2.5
Halbleiterphysik und
Magnetismus**

Dr. U. Siegner
☎ 2500

**Fachbereich 2.6
Elektrische
Quantenmetrologie**

Dr. F. J. Ahlers
☎ 2600

**Fachbereich 3.1
Metrologie in der
Chemie**

Dr. B. Güttler
☎ 3100

**Fachbereich 3.2
Analytische Mess-
technik und Druck**

*Prof. Dr. K.-D. Sommer
☎ 3010

**Fachbereich 3.3
Chemisch-physikal.
Stoffeigenschaften**

Dr. H. Bauer
☎ 3300

**Fachbereich 3.4
Grundlagen des
Explosionsschutzes**

Dr. H. Bothe
☎ 3400

**Fachbereich 3.5
Zünddurchschlags-
prozesse**

Dr. U. Klausmeyer
☎ 3500

**Fachbereich 3.6
System- und
Eigensicherheit**

Dr. U. Johannsmeyer
☎ 3600

**Fachbereich 3.7
Zündquellensicherheit**

Dr. M. Beyer
☎ 3700

**Fachbereich 4.1
Photometrie und an-
gewandte Radiometrie**

Dr. K. Stock
☎ 4100

**Fachbereich 4.2
Bild- und Wellenoptik**

Dr. E. Buhr
☎ 4200

**Fachbereich 4.3
Quantenoptik und
Längeneinheit**

Dr. P. Becker
☎ 4300

**Fachbereich 4.4
Zeit und Frequenz**

Dr. E. Peik
☎ 4400

**Fachbereich 4.5
Optische Technologien**

Dr. S. Kück
☎ 4500

**Fachbereich 5.1
Oberflächenmess-
technik**

Dr. L. Koenders
☎ 5100

**Fachbereich 5.2
Dimensionelle
Nanometrologie**

Dr. H. Bosse
☎ 5200

**Fachbereich 5.3
Koordinatenmess-
technik**

Dr. F. Härtig
☎ 5300

**Fachbereich 5.4
Interferometrie an
Maßverkörperungen**

Dr. A. Abou-Zeid
☎ 5400

**Fachbereich 5.5
Wissenschaftlicher
Gerätebau**

Prof. Dr. F. Löffler
☎ 5500

Deutscher Kalibrierdienst

**Akkreditierungsstelle des
Deutschen Kalibrierdienstes**

M. Schaller
☎ 1910

DKD
Aufsicht: BMWi

Benannte Stelle (Nummer 0102) nach EG-Richtlinien
94/9/EG, 90/384/EWG, 2004/22/EG

Zertifizierungsstelle

Dr. H. Stolz
im Fachbereich Q.3
☎ 8320

Organigramm

Stand: 1. Dezember 2008

Fachbereich PST Präsidentialer Stab Dr. J. Stenger ☎ 1009	Presse- und Öffentlichkeitsarbeit Dr. Dr. J. Simon ☎ 3005	Vertreter d. Präsidenten in Berlin Dr. W. Buck ☎ (Ch) 7454	Qualitätsmanager Dr. A. Odin ☎ 8330	
Abteilung 6 Ionisierende Strahlung Dr. H. Janßen ☎ 6010	Abteilung 7 Temperatur und Synchrotronstrahlung Dr. W. Buck ☎ (Ch) 7454	Abteilung 8 Medizinphysik und metrologische Informationstechnik Prof. Dr. H. Koch ☎ (Ch) 7343	Abteilung Q Wissenschaftlich- technische Querschnittsaufgaben Dr. R. Weiß ☎ 8010	Abteilung Z Verwaltungsdienste C. Tampier ☎ 9010
Fachbereich 6.1 Radioaktivität Dr. D. Arnold ☎ 6100	Fachbereich 7.1 Photonenradiometrie Dr. G. Ulm ☎ (Ch) 7312	Fachbereich 8.1 Medizinische Messtechnik Dr. B. Ittermann ☎ (Ch) 7318	Referat Q.11 Wissenschaftliche Bibliotheken Dr. J. Meier ☎ 8131	Referat Z.11 Haushalt und Beschaffung M. Wasmuß ☎ 9110
Fachbereich 6.2 Dosimetrie für die Strahlentherapie Dr. H.-M. Kramer ☎ 6200	Fachbereich 7.2 Detektorradiometrie *Dr. W. Buck ☎ (Ch) 7454	Fachbereich 8.2 Biosignale Dr. L. Trahms ☎ (Ch) 7213	Fachbereich Q.2 Theoretische Grundlagen *Dr. R. Weiß ☎ 8010	Referat Z.12 Personal S. Wiemann ☎ 9120
Fachbereich 6.3 Strahlenschutz- dosimetrie Dr. P. Ambrosi ☎ 6300	Fachbereich 7.3 Hochtemperatur- und Vakuumphysik Dr. J. Hollandt ☎ (Ch) 7369	Fachbereich 8.3 Biomedizinische Optik Prof. Dr. R. Macdonald ☎ (Ch) 7542	Fachbereich Q.3 Gesetzl. Messwesen u. Technologietransfer Dr. P. Ulbig ☎ 8300	Referat Z.13 Justitiariat M. Gahrens ☎ 9130
Fachbereich 6.4 Ionenbesch. u. Refe- renzstrahlungsfelder Dr. F. Wissmann ☎ 6400	Fachbereich 7.4 Temperatur Dr. J. Fischer ☎ (Ch) 7473	Fachbereich 8.4 Mathematische Modellierung und Datenanalyse Dr. M. Bär ☎ (Ch) 7687	Fachbereich Q.4 Informations- technologie Dr. S. Hackel ☎ 8400	Referat Z.14 Organisation und Controlling Dr. J. Jaspers ☎ 9140
Fachbereich 6.5 Neutronenstrahlung Dr. H. Schuhmacher ☎ 6500	Fachbereich 7.5 Tiefemperaturthermo- dynamik u. -technologie Dr. T. Schurig ☎ (Ch) 7290	Fachbereich 8.5 Metrologische Informationstechnik Prof. Dr. D. Richter ☎ (Ch) 7479	Fachbereich Q.5 Technische Zusammenarbeit D. Schwohnke ☎ 8200	Referat Z.15 Verwaltung Berlin A. Lubinus ☎ (Ch) 7449
Fachbereich 6.6 Grundlagen der Dosimetrie *Dr. H. Janßen ☎ 6010	Fachbereich 7.6 Wärme Dr. T. Lederer ☎ (Ch) 7230		Referat Q.61 Technischer Dienst M. Frühauf ☎ 9170	Referat Z.16 Innerer Dienst M. List ☎ 9160
Referat 6.71 Betrieblicher Strahlenschutz Dr. R. Simmer ☎ 6710	Fachbereich IB.T Technisch-wissensch. Infrastruktur Berlin Dr. F. Melchert ☎ (Ch) 7446			Referat Z.17 Ausbildung P. J. Dickers ☎ 9240

Ausschüsse

Personal	A-PE	Dr. Weiß	☎ 8010
Investitionen	A-IV	Prof. Dr. Peters	☎ 2000
IT-Infrastruktur	A-IT	Dr. Hackel	☎ 8400
Metrologische Dienstleistungen	A-MD	Prof. Dr. Peters	☎ 2000
Internationale Zusammenarbeit	A-IZ	Prof. Dr. Kühne	☎ 3000
Qualitätsmanagement	A-QM	Dr. Odin	☎ 8330
Forschungsprogramme	A-FP	Dr. Stenger	☎ 1009

Gesamtpersonalrat

U. Meyer ☎ 1090

Örtlicher Personalrat Braunschweig

W. Krien ☎ 1092

Örtlicher Personalrat Berlin

R. Thomas ☎ (Ch) 7360

Gleichstellungsbeauftragte

B. Behrens ☎ 9133

Gesamtvertretung der Schwerbehinderten

T. Quandt ☎ 1097

Vertretung der Schwerbehinderten Braunschweig

T. Quandt ☎ 1097

Vertretung der Schwerbehinderten Berlin

I. Wichmann ☎ (Ch) 7448

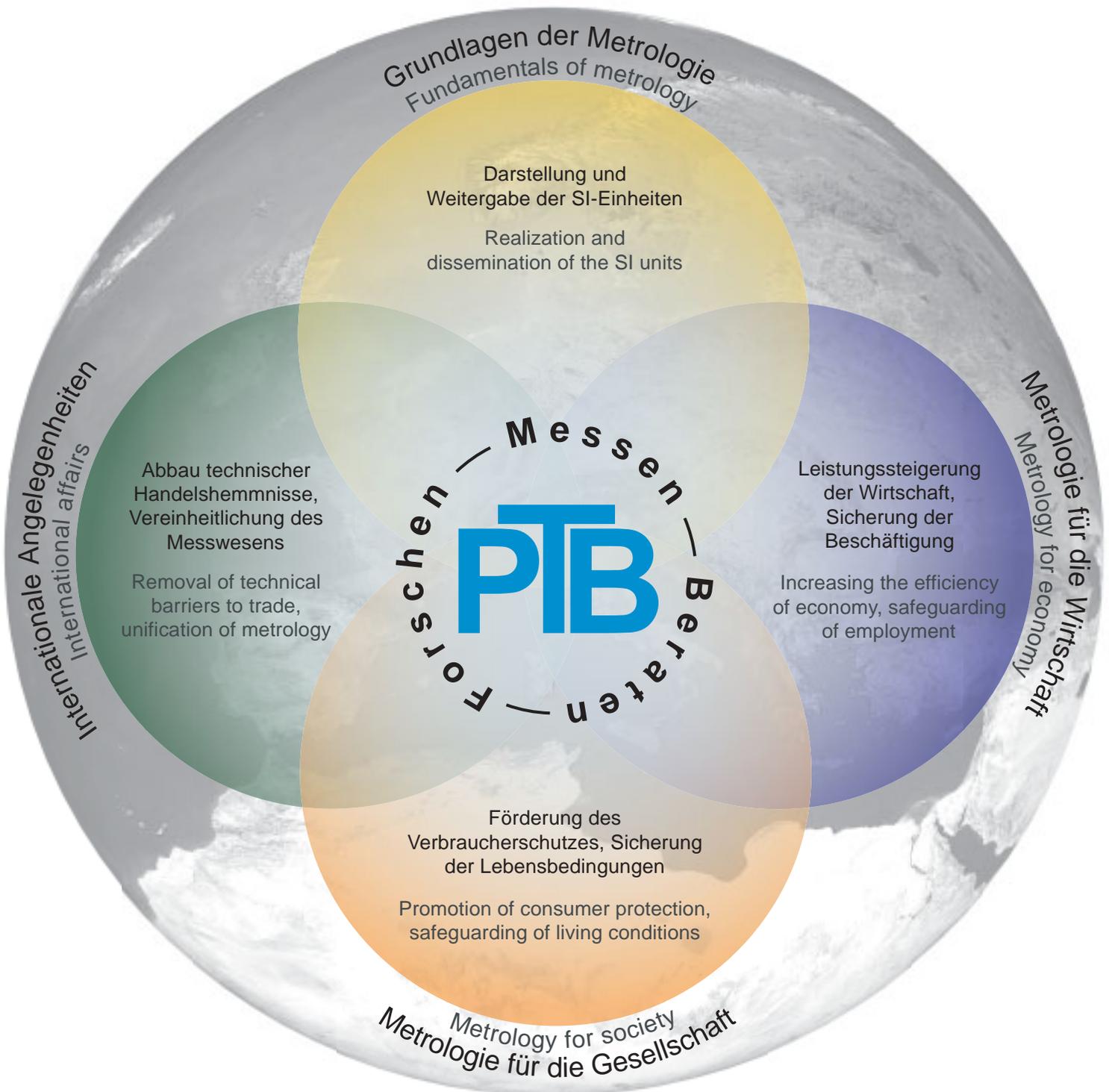
Zeichenerklärung

☎ (0531) 592-0 Braunschweig/Durchwahl 592 ...

☎ (030) 3481-1 Berlin Charlottenburg (CH)/Durchwahl 3481 ...

*wahrgenommen durch

Arbeitsgebiete und Ziele



Die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) – das nationale Metrologie-Institut mit wissenschaftlich-technischen Dienstleistungsaufgaben

Für einen modernen Industriestaat ist eine leistungsfähige Infrastruktur für das Messen, Normen, Prüfen und für die Qualitätssicherung eine Grundvoraussetzung. Nur eine optimierte messtechnische Infrastruktur ermöglicht den richtigen Einsatz der Technik zum Wohle des Menschen, die effektive und umweltschonende Nutzung von Energie und Rohstoffen sowie den Austausch von Gütern, auch über Ländergrenzen hinweg. Die Physikalisch-Technische Bundesanstalt in Braunschweig und Berlin, die zum Dienstbereich des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) gehört, ist in der Bundesrepublik Deutschland mit dieser Aufgabe betraut.

Der Existenz von Bundesanstalten liegt ein staatlicher Auftrag zugrunde, festgelegt in Gesetzen und Verordnungen. Im Falle der PTB ist dies ein Auftrag von Verfassungsrang, abgeleitet aus der originären Verantwortung des Staates für die Einheitlichkeit des Messwesens sowie für die Sicherheit und den Schutz des Bürgers. Dabei geht es auch um das Vertrauen, das jeder Einzelne, ob als Verbraucher, Behörde oder Firma, in die Zuverlässigkeit und Unparteilichkeit von Messungen haben muss. Der spezifische staatliche Auftrag für die PTB ist es, eine international akzeptierte leistungsfähige messtechnische Infrastruktur für Gesellschaft, Handel und Wirtschaft gleichermaßen bereitzustellen. Forschung und Technologieentwicklung dienen dazu, diesen Auftrag verantwortungsvoll und kompetent auszuführen.

Der Anteil an Forschung und Entwicklung über alle vier Arbeitsgebiete beträgt rund zwei Drittel aller PTB-Aktivitäten.

Grundlagen der Metrologie

Der Bereich „Grundlagen der Metrologie“ umfasst die in der Satzung verankerten Arbeiten zur Darstellung und Weitergabe der SI-Einheiten und der gesetzlichen Zeit. Hierzu gehören insbesondere die Entwicklung und Bereitstellung von Primärnormalen und Normalmesseinrichtungen und der gegebenenfalls für die Weitergabe der Einheiten benötigten Sekundär- und Transfernormale. Mission ist „die Schaffung des Fundaments für das nationale Messwesen, das den heutigen und für die Zukunft absehbaren Anforderungen genügt“.

Eine besondere Herausforderung stellen die Arbeiten zur Rückführung von SI-Einheiten auf Fundamentalkonstanten dar, wie dies für Sekunde, Meter, Volt und Ohm bereits gelungen ist, da man – zumindest nach unserem heutigen Verständnis der Physik – dann von einer von Ort und Zeit unabhängigen Realisierung der jeweiligen Einheit ausgehen kann. Durch den Beschluss des Comité International des Poids et Mesures (CIPM), vorbereitende Maßnahmen zur Neudefinition der Einheiten Ampere, Kelvin, Kilogramm und Mol auf der Basis von Fundamentalkonstanten einzuleiten, haben diese Arbeiten zusätzlich an Aktualität und Bedeutung gewonnen. Aber auch bei der Darstellung von Einheiten auf der Basis klassischer Prinzipien, z. B. für die dimensionelle Messtechnik, steigen die Anforderungen an die tolerierbaren Unsicherheiten stetig, so dass Technologien verbessert bzw. neu entwickelt und genutzt werden müssen. Zunehmende Bedeutung gewinnt die Rückführung von Messungen in der analytischen und speziell klinischen Chemie auf international anerkannte Normale oder Normalmesseinrichtungen, die für ausgewählte organische und anorganische Analyte in der PTB und ihren Kooperationspartnern (BAM, UBA, DGKL) entwickelt bzw. betrieben werden. Von besonderer gesellschaftlicher Bedeutung ist die Entwicklung von Normalen und Normalmesseinrichtungen für die medizinische Diagnostik und Therapiekontrolle, beispielsweise für die Dosimetrie ionisierender Strahlung, die Ultraschall-Diagnostik oder optische, bioelektrische, biomagnetische und NMR-Diagnoseverfahren.

Ganz offensichtlich ist der Anteil an Forschung und Entwicklung in dem Bereich

„Grundlagen der Metrologie“ besonders hoch, weit gespannt und deckt wesentliche Bereiche der modernen Natur- und Ingenieurwissenschaften ab. Die Ergebnisse bilden nicht nur die Voraussetzung für die Entwicklung und Realisierung genauer Normale, sondern liefern auch – oft in Kooperation mit universitären und außeruniversitären Partnern – wesentliche Erkenntnisse für die Natur- und Ingenieurwissenschaften im Allgemeinen.

Metrologie für die Wirtschaft

Für eine exportorientierte Volkswirtschaft, wie die der Bundesrepublik Deutschland, ist eine hochentwickelte metrologische Infrastruktur sowie die Verfügbarkeit metrologischer Know-hows auf höchstem Niveau zur Unterstützung der Entwicklung neuer Technologien eine unabdingbare Voraussetzung.

Die PTB hat seit ihrer Gründung im Jahre 1887 zum Nutzen der deutschen Wirtschaft nicht nur die Basiseinheiten durch metrologische Grundlagenforschung dargestellt, sondern durch technische Entwicklungen von Normalen, Normalmessgeräten und erprobten Messverfahren Grundlagen für genaue und zuverlässige Messungen und Prüfungen in Industrie und Handel geschaffen. Die Durchdringung der Produktionsprozesse mit einer Messtechnik, die allen internationalen Ansprüchen gerecht wird, ist eine entscheidende Voraussetzung für zuverlässig funktionierende Qualitätsmanagement-Systeme in der Wirtschaft. Dabei ist es unverzichtbar, alle Messergebnisse auf das SI zurückzuführen.

Die Weitergabe der Einheiten wird durch die Akkreditierungen des Deutschen Kalibrierdienstes (DKD) größtenteils auf die Ebene der industriellen Messtechnik verlagert. Die DKD-akkreditierten Kalibrierlaboratorien werden durch die DKD-Akkreditierungsstelle kompetent überwacht und in nationalen und internationalen Gremien vertreten.

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

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

Metrologie für die Gesellschaft

In weiten Bereichen des täglichen Lebens besteht ein besonderes öffentliches Interesse an richtigen Messergebnissen und zuverlässigen Messeinrichtungen. Die Metrologie für die Gesellschaft umfasst daher überwiegend Aufgaben, die gesetzlich geregelt sind. In einer Vielzahl von Gesetzen und Verordnungen sind der PTB verschiedene Tätigkeiten zugewiesen; in den meisten dieser Rechtsvorschriften wird sie als einzige Stelle genannt. Hierin liegt eine besondere Verantwortung. Es ist Aufgabe der PTB, „Messtechnik und -verfahren zum angemessenen Schutz der Verbraucher im geschäftlichen und amtlichen Verkehr, der arbeitenden Bevölkerung im beruflichen Umfeld, zum Erhalt und der Wiederherstellung der Gesundheit, für die persönliche und industrielle Sicherheit sowie zum Schutz der Natur und Umwelt“ zur Verfügung zu stellen und einzusetzen.

Ein Schwerpunkt in diesem Bereich ist die Bauartzulassung bzw. Baumusterprüfung von Messgeräten im Rahmen nationaler oder europäischer Rechtsvorschriften, zum Beispiel auf den Gebieten Energiemesstechnik für elektrische Energie, Gas und Wasser (Wärme, Kälte), Sicherheit im Straßenverkehr (Geschwindigkeitsüberwachung, Atemalkohol), Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) und Umweltmesstechnik (Absolutmessungen in der Schadstoff- und Spurenanalyse, Lärmschutz etc.). Die meisten Bauartzulassungen erfüllt die PTB auf der Grundlage des Eichgesetzes. Bedingt durch die Umsetzung der Europäischen Messgeräte-

richtlinie (MID) werden das Eichgesetz und die Eichordnung novelliert. Die PTB ist inzwischen als benannte Stelle nach europäischem Recht anerkannt, so dass den Kunden aus der Industrie die von der MID geforderten Konformitätsbewertungsverfahren angeboten werden können.

Die PTB ist gemäß Medizinproduktegesetz zuständig für die Sicherstellung der Einheitlichkeit des Messwesens in der Medizin. So entwickelt die PTB neue oder verbessert bereits existierende Messverfahren für Diagnostik und Therapiekontrolle. Zum anderen leistet die PTB entscheidende Beiträge durch Entwicklung von Normalen und Normalmesseinrichtungen, beispielsweise für die Dosimetrie ionisierender Strahlung oder für medizinische Geräte mit Messfunktion sowie durch Arbeiten zur Rückführung von analytischen Messungen in der klinischen Chemie auf die SI-Einheiten bzw. Normalmessverfahren.

In Absprache und Kooperation mit der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) ist die PTB auf den wirtschaftlich und vor allem gesellschaftlich wichtigen Gebieten der physikalischen Sicherheitstechnik und des Explosionsschutzes elektrischer Betriebsmittel tätig. Auf Grund ihrer Kompetenz fällt ihr dabei eine internationale Referenzfunktion zu. Gleiches gilt für die Arbeiten auf dem Gebiet des Strahlenschutzes.

Internationale Angelegenheiten

Mit der Gründung der Meterkonvention im Jahre 1875 wurde auf höchster staatlicher Ebene manifestiert, dass Metrologie eine internationale Angelegenheit ist. Durch die zunehmende Globalisierung von Wirtschaft und Handel hat diese Aufgabe in den letzten Jahren erheblich an Bedeutung gewonnen. Im Geschäftsbereich „Internationale Angelegenheiten“ ist es Aufgabe der PTB, „zur internationalen Einheitlichkeit des Messwesens und damit zum Abbau nicht tarifärer Handelshemmnisse beizutragen“. Hierzu dienen Kooperationen mit anderen nationalen Metrologieinstituten, maßgebliche Mitarbeit in den internationalen Gremien und technisch-ökonomische Zusammenarbeit mit Entwicklungs- und Schwellenländern.

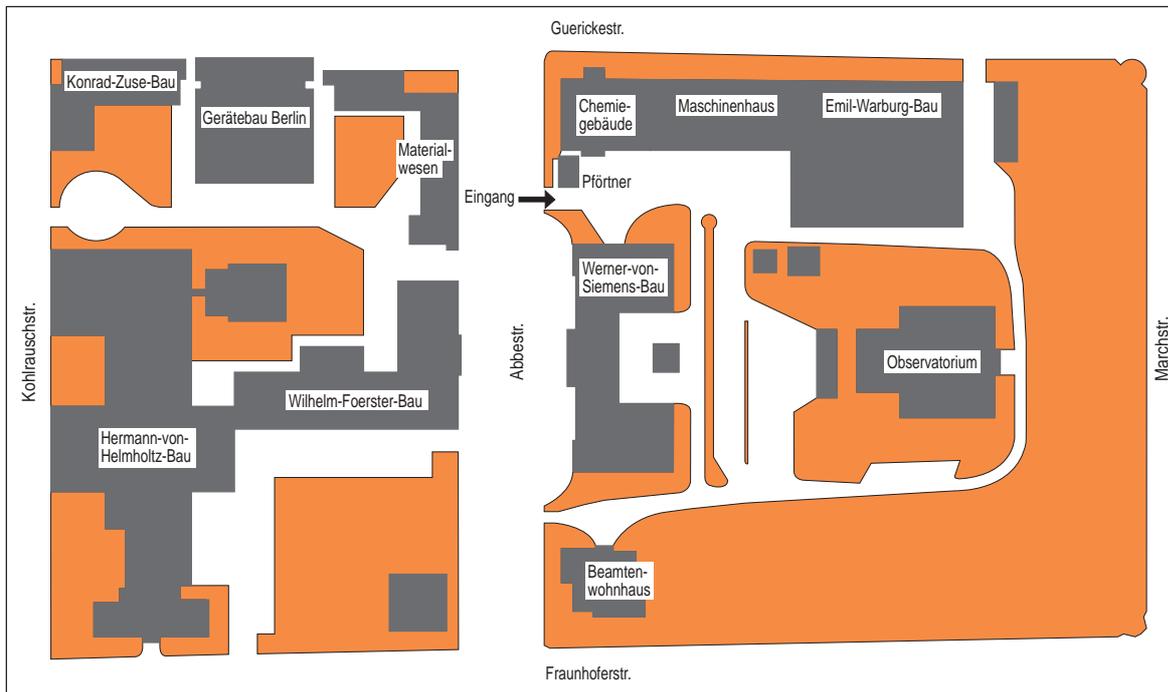
Wesentliches Element der Kooperation mit Partnerinstituten sind internationale „Key Comparisons“ von Normalen und Normalmesseinrichtungen und sich daraus ableitende F&E-Arbeiten. Im Rahmen der internationalen Abkommen zur gegenseitigen Anerkennung von Messergebnissen und Zertifikaten der nationalen Metrologieinstitute und der akkreditierten Prüf- und Kalibrierlaboratorien kommt diesen Vergleichen besondere Bedeutung zu.

Die Anforderungen an die Metrologie werden in Zukunft sowohl vom Umfang als auch von der Komplexität her stetig wachsen, so dass ein einzelnes Institut nicht sämtlichen Ansprüchen auf Dauer genügen kann. Koordination und Kooperation bei F&E und Dienstleistungen sind daher unumgänglich. Die rechtsfähige europäische Metrologieorganisation EURAMET stellt hier die erforderlichen Strukturen zur Durchführung eines europäischen Metrologieforschungsprogramms zur Verfügung.

Neben ihrem europäischen Engagement arbeitet die PTB ebenfalls maßgeblich in allen internationalen Metrologieorganisationen mit, zu einem erheblichen Teil in leitender Funktion. Außerdem leistet die PTB einen wesentlichen Beitrag zur internationalen Normung durch Mitarbeit in Gremien von ISO, IEC, CEN, CENELEC. Die weltweite Angleichung von Anforderungen und Prüfvorschriften im gesetzlichen Messwesen dient dem Abbau nichttarifärer Handelshemmnisse und damit der exportorientierten deutschen Messgeräteindustrie. Mit diesen Zielen arbeitet die PTB aktiv in OIML und WELMEC mit.

Einen erheblichen Umfang nimmt die Technische Zusammenarbeit mit Entwicklungs- und Schwellenländern ein. Die PTB gibt ihre Erfahrungen weiter und leistet aktive Hilfe beim Aufbau der technischen Infrastruktur für die Metrologie sowie für das Normen-, Prüf- und Qualitätswesen einschließlich der Akkreditierung und der Zertifizierung. Die finanziellen Mittel werden überwiegend vom Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (BMZ) sowie weiteren nationalen und internationalen Gebern, wie der EU und der Weltbank, zur Verfügung gestellt.

Geländeplan Berlin-Charlottenburg



100 Meter

Legende zum Geländeplan Braunschweig

Präsidium

Zentralgebäude

Abteilung Z

Verwaltung und Betrieb
Annahme- und Versandgebäude
Fahrbereitschaft
Gästehaus
Hauptwerkstatt mit Materiallager
Kasino
Kohlrausch-Bau
Vieweg-Bau
Wache
Wirtschaftsgebäude
Zentralgebäude

Abteilung 1

Mechanik und Akustik
Abbe-Bau
Bessel-Bau
Bunsen-Bau
Gauß-Bau
Helmholtz-Bau I
Helmholtz-Bau II
Leibniz-Bau
Prandtl-Bau
Schlichting-Bau
Willy-Wien-Turm

Abteilung 2

Elektrizität
Heisenberg-Bau
Hertz-Bau
Kohlrausch-Bau
Meißner-Bau
Ohm-Bau
Prandtl-Bau
Reinraumzentrum
Schering-Bau
Gumlich-Haus

Abteilung 3

**Thermodynamik und
Explosionsschutz**
Abbe-Bau
Bunsen-Bau
Explosionsprüfstand
Nernst-Bau
Planck-Bau
Raumzellen-Bau IV
Sicherheitstechnik
Weber-Bau

Abteilung 4

Optik
Bessel-Bau
Einstein-Bau
Giebe-Bau
Kopfermann-Bau
v.-Laue-Bau
Paschen-Bau
Reinraumzentrum
Vieweg-Bau

Abteilung 5

Fertigungsmesstechnik
Abbe-Bau
Bessel-Bau
Bothe-Bau
Hauptwerkstatt
Kohlrausch-Bau
Meißner-Bau
Meitner-Bau
Ohm-Bau
Paschen-Bau
Reinraumzentrum

Abteilung 6

Ionisierende Strahlung
Bothe-Bau
Chadwick-Bau
Elster-Geitel-Bau
Geiger-Bau
Hahn-Bau
Meitner-Bau
Röntgen-Bau

Abteilung Q

**Wissenschaftlich-technische
Querschnittsaufgaben**
Annahme- und Versandgebäude
Betriebswerkstätten
Bibliothek
Elektrozentrale
Feuerwehr
Kohlrausch-Bau
Vieweg-Bau
Zentralgebäude

PÖ

Zentralgebäude

unterstrichen: Sitz Abteilungsleitung