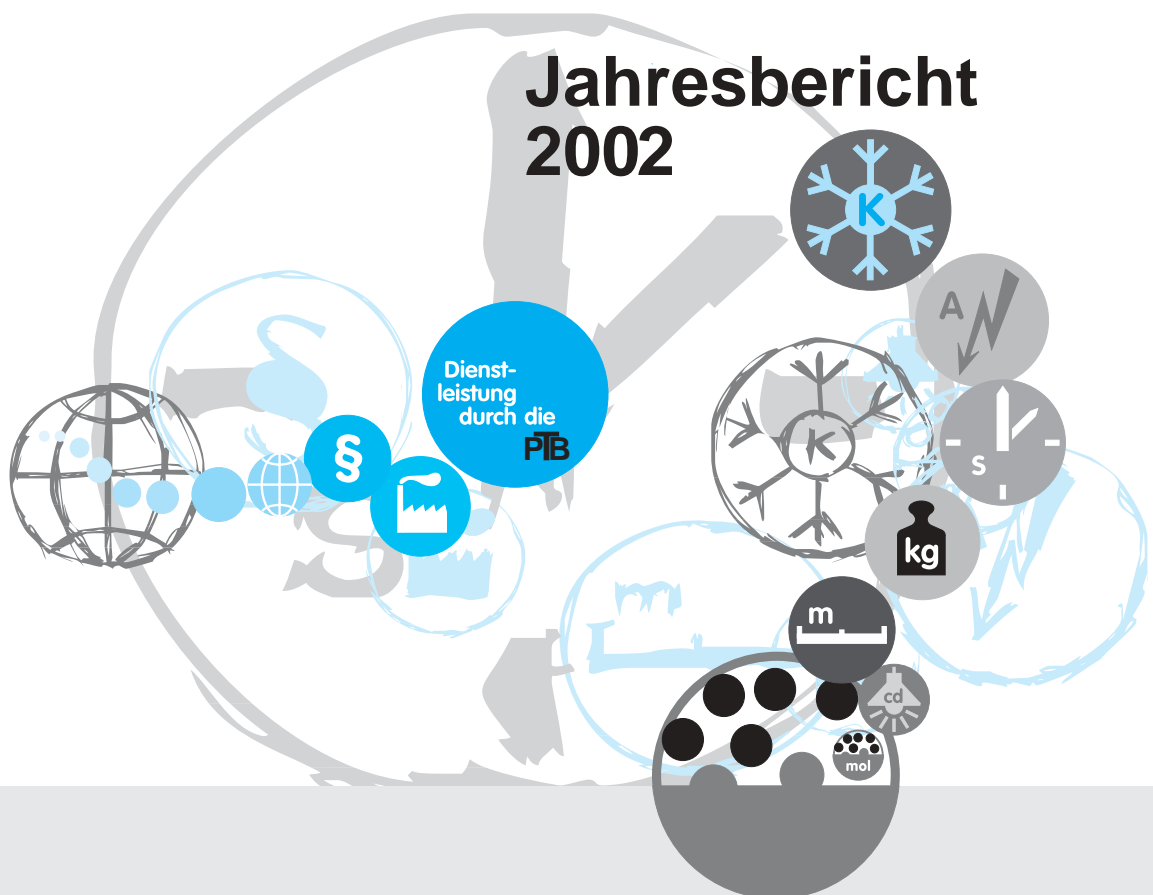


Physikalisch- Technische Bundesanstalt

Braunschweig und Berlin

Jahresbericht 2002



Vorwort

„Summarisch betrachtet sind die Fachkompetenz und die Qualität der Arbeiten der PTB-Mitarbeiter exzellent“, so bescheinigt es uns die international besetzte Expertenkommission, die 2002 vom damaligen Bundesminister für Wirtschaft und Technologie mit der Evaluation der PTB beauftragt wurde.

Über dieses Urteil freuen wir uns, stellt es doch eine schöne Anerkennung unserer kontinuierlichen, qualifizierten fachlichen Arbeit dar. Dafür möchte ich auch an dieser Stelle allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern danken. Wir alle hoffen jetzt aber auch, dass es nicht allein bei dieser Anerkennung bleibt, sondern dass die Empfehlungen der Kommission zur Verbesserung der Rahmenbedingungen und der Ausstattung zügig durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit umgesetzt werden und somit nach Jahren des Abbaus ein Signal zum Aufbruch in die Zukunft gegeben wird.

Über die Ergebnisse der fachlichen Arbeit und – neben der Evaluation – besondere Ereignisse des letzten Jahres gibt der hier vorliegende Bericht Zeugnis. Drei Nachrichten mögen die Spannweite dieser Ergebnisse beispielhaft belegen.

Beispiel 1: Wir haben eine neue Kraftmess-einrichtung aufgebaut, mit der sich kleinste Kräfte im mN-Bereich rückführbar messen lassen. Im Zeitalter der Mikrosystemtechnik und der Nanotechnologie ist dies auch für die industrielle Praxis ein Meilenstein.

Beispiel 2: Mit einem EUV-Lithographieprozess konnten im Rahmen einer Industriekooperation in unserem Radiometrielabor bei BESSY II erstmals in Europa Strukturen mit Breiten von nur 50 nm erzeugt werden.

Beispiel 3: Softwareprüfungen der PTB sind mitentscheidend bei der Zulassung von elektronischen Wahlgeräten. Solche Wahlgeräte wurden bei der Bundestagswahl 2002

erstmals in verschiedenen Städten und Gemeinden rechtsverbindlich eingesetzt. Neben diesen und vielen weiteren Nachrichten nehmen die Berichte aus den Fachabteilungen den größten Umfang dieses Jahresberichts ein. Wie schon gewohnt, finden sich weiterführende und detailliertere Informationen, so z. B. die Übersicht über unsere Publikationen 2002, im Internet auf unserer Homepage.

Erfreulich für uns war und ist auch das Interesse der Öffentlichkeit an unserer Arbeit. Rund 6 000 Besucher fanden den Weg in die Laboratorien der PTB, die sich in der „Langen Nacht der Wissenschaften“ in Berlin und an den beiden „Tagen der offenen Tür“ in Braunschweig einer breiten Öffentlichkeit präsentierten. Und eine noch größere Reichweite hat unser wissenschaftsjournalistisches Magazin „maßstäbe“ mit mittlerweile über 12 000 Abonnenten – mit stark zunehmender Tendenz. Zahlreiche positive Rückmeldungen (die Leserbriefe füllen einen dicken Aktenordner) zeigen uns, dass wir hier auf dem richtigen Weg sind.

Zum Schluss: Die Geschichte der PTR/PTB ist nun von der Gründung, 1887, bis 2001 vollständig aufgeschrieben. Das von meinem geschätzten Amtsvorgänger, Prof. Dr. Dieter Kind, verfasste Buch „Herausforderung Metrologie“ beschreibt die Entwicklung der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt seit 1945. Dieses Buch vervollständigt die mit den früheren Bänden von David Cahan und Ulrich Kern begonnene geschichtliche Darstellung unserer Institution. Für alle, die sich der PTB verbunden fühlen, eine interessante Lektüre. Eine ebensolche wünsche ich allen Lesern dieses Jahresberichts.

Ernst O. Göbel



Foreword

"In summary, the scientific-technical competence and work of PTB's staff are excellent." This is the final judgement by the international expert commission which in 2002 was charged by the then Federal Minister of Economics and Technology with the evaluation of the PTB.

This judgement fills us with delight, all the more so as it appreciates our continuous, qualified work, and I gladly take the occasion to thank all our staff for their dedication and commitment. We all hope now that this appreciation will not be the only outcome of the evaluation, but that the recommendations given by the commission on how to improve the general conditions of our work, our facilities and equipment will be implemented promptly by the Federal Ministry of Economics and Labour so that, after years of cut-downs and reductions, a signal for the future is given.

This Annual Report will give a review of the results of our work, of the evaluation and, in particular, of the highlights of the past year. From among the many events, three shall serve to illustrate the bandwidth of our work:

Example 1: A new force measuring device was set up by which smallest forces in the mN range can be traceably measured. In the age of micro system and nanotechnology, this can be regarded as a milestone also for the industrial practice.

Example 2: For the first time in Europe, we have succeeded in generating structures with widths of only 50 nm using an EUV lithography process within the scope of an industrial cooperation project at our Radio-metry Laboratory at BESSY II.

Example 3: The PTB software tests are determining factors in the approval of electronic voting machines. Such voting machines were used with legally binding effect in several towns and communities in Germany in the 2002 federal parliamentary elections.

Apart from these highlights and many other news, the reports from the individual divisions have the largest share in this Annual Report. As usual, more detailed and profound information, e.g. the survey of our publications in 2002, can be found on our homepage in the Internet.

We were especially pleased to note the great interest the public takes in our work. About 6 000 visitors made their way into the PTB's laboratories when these opened to the general public in the „Long Night of the Sciences“ in Berlin and on the two „Visiting Days“ in Braunschweig. Our scientific journal „maßstäbe“ reaches an even greater number of people with meanwhile more than 12 000 subscribers and an ever-increasing tendency upwards. Numerous positive reactions prove that we are on the right path (the letters from our readers already fill a thick file).

And, last but not least: the entire history of the PTR/PTB, from its foundation in 1887 until 2001, has now been written down. The third volume, „Herausforderung Metrologie“ („Metrology as a Challenge“), written by my esteemed predecessor, Professor Dr. Dieter Kind, and published only recently, describes the development of the PTB since 1945. Together with the previous works, written by David Cahan and Ulrich Kern, this book completes the historical description of our institution. Everyone with a special attachment to the PTB will find it interesting to read, and I hope the same will apply to this Annual Report.

Ernst O. Göbel

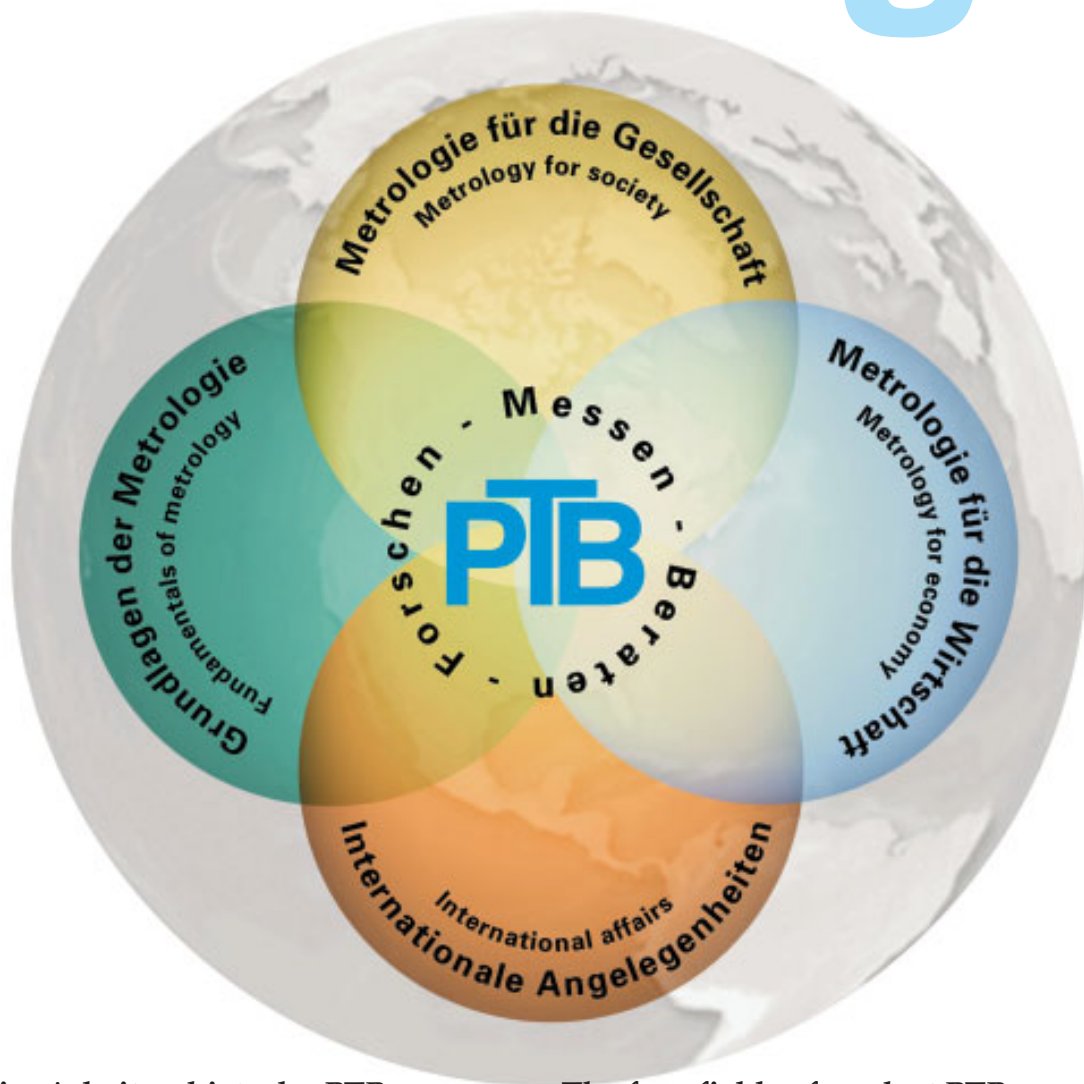
Inhaltsverzeichnis

Vorwort • Foreword

| | |
|--|-----|
| Die PTB | 5 |
| Arbeitsgebiete und Ziele • Fields of work and objectives | 6 |
| Nachrichten des Jahres • News of the year | 16 |
| Zahlen und Fakten • Figures and facts | 36 |
| Die Abteilungen | 46 |
| Mechanik und Akustik | 47 |
| Elektrizität | 57 |
| Thermodynamik und Explosionsschutz | 67 |
| Optik | 77 |
| Fertigungsmesstechnik | 87 |
| Ionisierende Strahlung | 97 |
| Temperatur und Synchrotronstrahlung | 107 |
| Medizinphysik und metrologische Informationstechnik | 117 |
| Wissenschaftlich-technische Querschnittsaufgaben | 125 |
| Der Deutsche Kalibrierdienst | 136 |
| Die Anlagen | 138 |
| Kuratorium | 139 |
| Organigramm | 140 |
| Organisatorisches | 142 |
| Jahresbericht im Internet | 143 |
| Geländepläne | 144 |

PTB
Die

Arbeitsgeb



Die vier Arbeitsgebiete der PTB

Grundlagen der Metrologie

Ziele: Darstellung und Weitergabe der SI-Einheiten

Metrologie für die Wirtschaft

Ziele: Leistungssteigerung der Wirtschaft, Sicherung der Beschäftigung

Metrologie für die Gesellschaft

Ziele: Förderung des Verbraucherschutzes, Sicherung der Lebensbedingungen

Internationale Angelegenheiten

Ziele: Abbau technischer Handelshemmnisse, Vereinheitlichung des Messwesens

The four fields of work at PTB

Fundamentals of metrology

Objectives: realization and dissemination of the SI units

Metrology for economy

Objectives: increasing the efficiency of economy, safeguarding of employment

Metrology for society

Objectives: promotion of consumer protection, safeguarding of living conditions

International affairs

Objectives: removal of technical barriers to trade, unification of metrology

iete

Die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) – das nationale Metrologie-Institut mit wissenschaftlich-technischen Dienstleistungsaufgaben

Für einen modernen Industriestaat ist eine leistungsfähige Infrastruktur für das Messen, Normen, Prüfen und für die Qualitätssicherung eine Grundvoraussetzung. Nur eine optimierte messtechnische Infrastruktur ermöglicht den richtigen Einsatz der Technik zum Wohle des Menschen, die effektive und umweltschonende Nutzung von Energie und Rohstoffen sowie den Austausch von Gütern, auch über Ländergrenzen hinweg. Die Physikalisch-Technische Bundesanstalt in Braunschweig und Berlin, die zum Dienstbereich des *Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit* gehört, ist in der Bundesrepublik Deutschland mit dieser Aufgabe betraut.

Der Existenz von Bundesanstalten liegt ein staatlicher Auftrag zugrunde, festgelegt in Gesetzen und Verordnungen. Im Falle der PTB ist dies ein Auftrag von Verfassungsrang, abgeleitet aus der originären Verantwortung des Staates für die Einheitlichkeit des Messwesens sowie für die Sicherheit und den Schutz des Bürgers. Dabei geht es auch um das Vertrauen, das jeder Einzelne, ob als Verbraucher, Behörde oder Firma, in die Zuverlässigkeit und Unparteilichkeit von Messungen haben muss. Der spezifische staatliche Auftrag für die PTB ist es, eine international akzeptierte leistungsfähige messtechnische Infrastruktur für Gesellschaft, Handel und Wirtschaft gleichermaßen bereitzustellen. Forschung und Technologieentwicklung dienen dazu, diesen Auftrag verantwortungsvoll und kompetent auszuführen.

Der Anteil an Forschung und Entwicklung über alle vier nebenstehend graphisch dargestellten Arbeitsgebiete der PTB beträgt 60 % bis 65 %.

The Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) – the national metrology institute providing scientific and technical services

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

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

The share of research and development in the four areas of work of the PTB represented opposite is between 60 % and 65 %.

Grundlagen der Metrologie

Der Bereich „Grundlagen der Metrologie“ umfasst die in der Satzung verankerten Arbeiten zur Darstellung, Bewahrung 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. Weitere aussichtsreiche Kandidaten, an deren Rückführung auf Fundamentalkonstanten intensiv geforscht wird, sind das Ampere, das Kelvin und das Kilogramm. 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, DGKC) 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.

Hinsichtlich der Nutzung von Synchrotronstrahlung für die Radiometrie im UV-, VUV- bis in den Röntgen-Spektralbereich hat die PTB wissenschaftlich und technologisch Pionierarbeit geleistet. Mit der Nutzung von

Fundamentals of Metrology

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

Especially challenging is the task to provide traceability of the SI units to fundamental constants, as has already succeeded for the second, the metre, the volt and the ohm, because, at least to our present understanding of physics, it can then be assumed that the individual units have been realized independently of location and time. Further hopeful candidates whose traceability to fundamental constants is investigated in depth worldwide are the ampere, the kelvin and the kilogram. But also for the realization of units on the basis of classical principles, e.g. for dimensional metrology, the requirements for tolerable uncertainties increase permanently so that the existing technologies must be improved or new technologies be developed. Of increasing importance is the traceability of measurements in analytical and especially in clinical chemistry to internationally recognized standards or standard measuring devices developed and operated at the PTB and by its cooperation partners (BAM, UBA, DGKC) for selected organic and inorganic analytes. Of particular importance to society is the development of standards and standard measuring devices for medical diagnostics and therapy follow-up, for example for the dosimetry of ionizing radiation, ultrasound diagnostics or optical, bioelectric, biomagnetic and NMR diagnostic methods.

As to the use of synchrotron radiation for radiometry in the UV and VUV as well as in the X-ray spectral region, the PTB has done pioneering work both in the scientific and in the technological area. With the use of BESSY II in Berlin-Adlershof and the construction and commissioning of a compact electron storage ring for the generation of synchrotron

BESSY II in Berlin-Adlershof und dem Bau und der Inbetriebnahme eines Kompakt-speicherringes zur Erzeugung von Synchrotron-Strahlung im Niederenergiebereich (eV bis einige keV) wird die PTB über eine hervorragende apparative Ausstattung verfügen, die für die Metrologie und Forschung allgemein, nicht zuletzt aber auch für die industrielle Entwicklung, z. B. für die EUV-Lithographie, einmalige Messmöglichkeiten bieten.

Die PTB nimmt seit vielen Jahren bei der Realisierung der internationalen Atomzeit (TAI) eine führende Rolle ein, begründet durch den über Jahre kontinuierlichen Betrieb der genauesten Atomuhren. Die PTB wird die Arbeiten zur Entwicklung von primären Atomuhren mit verbesserter Genauigkeit, insbesondere „optischer“ Atomuhren auf der Basis lasergekühlter Atome oder Einzelionen einschließlich der Verfahren zur optischen Frequenzmessung weiterbetreiben und auch zukünftig wesentlich zu TAI beitragen. Neben den sehr grundlegenden Erkenntnissen, die dabei gewonnen werden, übernimmt die PTB damit für den Industriestaat Bundesrepublik Deutschland auch einen angemessenen Beitrag zur weltweiten messtechnischen Infrastruktur auf diesem Gebiet, wie sie z. B. GPS oder das europäische Projekt GALILEO darstellen.

Der Anteil an Forschung und Entwicklung ist 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.

radiation in the low-energy range (eV to some keV), the PTB will excellently be provided with technical instruments and devices, offering unique measuring capabilities not only for metrology and research in general but also for industrial developments, e.g. for EUV lithography.

Due to the long-time continuous operation of the most precise atomic clocks, the PTB has been playing a leading role in the realization of the international atomic time (TAI) for many years. The PTB will pursue its work on the development of primary atomic clocks with enhanced precision, especially “optical” atomic clocks on the basis of laser-cooled atoms or single ions including the methods for optical frequency measurement, and it will substantially contribute to the TAI also in the future. Apart from the very fundamental findings gained from this, the PTB thus also makes an adequate contribution on behalf of Germany as an industrialized state to the worldwide metrological infrastructure in this field such as, for example, GPS or the European GALILEO project.

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

Metrologie für die Wirtschaft

Forschung ist die Umsetzung von Geld in Wissen – Innovationen sind die Umsetzung von Wissen in Geld.

Unabhängig vom Auf- und Ab der Aktienmärkte ist der Trend zur Globalisierung der Märkte ungebrochen. Es ist daher für die nationalen Volkswirtschaften von großer Bedeutung, Rahmenbedingungen zu schaffen, die die Entwicklung und Vermarktung von hochwertigen Technologieprodukten entsprechend fördern, um international wettbewerbsfähig zu bleiben und um neue Märkte zu erschließen. Eine hochentwickelte metrologische Infrastruktur sowie die Verfügbarkeit metrologischer Know-hows auf höchstem Niveau zur Unterstützung der Entwicklung neuer Technologien sind dafür wichtige Komponenten.

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 erprobte Messverfahren Grundlagen für genaue und zuverlässige Messungen und Prüfungen in Industrie und Handel geschaffen.

Sie hat immer darauf hingearbeitet, die ihr vom Staat oder anderen Drittmittelgebern zur Verfügung gestellten Ressourcen (Geld) in messtechnisches Know-how (Wissen) umzusetzen und in vielfältiger Form für die Wirtschaft bekannt zu machen. Die Durchdringung der Produktionsprozesse mit einer Messtechnik, die allen internationalen Ansprüchen gerecht wird, ist eine entscheidende Voraussetzung für zuverlässig funktionierende Qualitätsmanagement-Systeme in der Wirtschaft. Dabei ist es unverzichtbar, alle Messergebnisse auf das SI zurückzuführen.

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

Wissenschaft und Wirtschaft enger zu verzahnen ist eine politische Forderung, welche die PTB ernst nimmt. Bei allen Forschungs- und

Metrology for economy

Research is the translation of money into knowledge – innovations are the translation of knowledge into money.

Despite the ups and downs on the stock markets, the trend towards the globalization of the markets is unbroken. It is therefore of great significance for the national economies that conditions are created which help advance the development and marketing of sophisticated technological products in order to remain internationally competitive and to open up new markets. A highly developed metrological infrastructure and the availability of metrological know-how at the highest level in order to support the development of new technologies here are important components.

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

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

An ever increasing number of German companies consistently put this requirement into practice either by having DKD-accredited laboratories of their own for the calibration of their working standards or by increasing their number, or by entrusting DKD laboratories with the calibration.

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

Entwicklungsergebnissen prüft die PTB, ob diese auch als Schutzrechte, Patente bzw. Gebrauchsmuster oder durch Know-how-Verträge für eine Vermarktung durch Innovationen in Anspruch genommen werden sollen. In diesem Zusammenhang hat die Messtechnik für die Wirtschaft auch durch ein spezielles Förderprogramm des BMWi weiteren Ansporn bekommen.

Diese Projekte werden intensiv in enger Zusammenarbeit mit großen Betrieben – aber insbesondere auch mit kleinen und mittelständischen Unternehmen der unterschiedlichsten Branchen bearbeitet. Die ersten Ergebnisse erwarten wir im kommenden Jahr.

Die Messtechnik der PTB für die Wirtschaft ist keine Einbahnstraße, auf der messtechnische Erkenntnisse und Verfahren für die Anwendung durch Veröffentlichungen und andere klassische Methoden der Wissenschaft bekannt gemacht werden. Diese Messtechnik ist ein Arbeitsgebiet, auf dem die PTB begonnen hat, in stärkerem Maße als in der Vergangenheit auch mit der Wirtschaft, der deutschen, dann der europäischen Wirtschaft die innovative Umsetzung von Forschungsergebnissen aktiv zu betreiben.

Eine besonders erfolgreiche Innovation mit der Schaffung von neuen Arbeitsplätzen bei einem mittelständischen Unternehmen hat auf dem Gebiet der Koordinatenmesstechnik durch die Entwicklung eines so genannten Fasertasters zur mechanisch-optischen Erfassung von Bauteilen der Mikrosystemtechnik und miniaturisierter Komponenten von makroskopischen Bauteilen (z. B. Einspritzdüsen für Automobil-Motoren) stattgefunden.

Solche Beispiele der Kooperation von Wissenschaft und Wirtschaft auf dem Gebiet der Metrologie summieren sich in Deutschland zu einem in Europa überdurchschnittlich guten volkswirtschaftlichen Gesamtergebnis. Die Universität Oxford bezeichnet in einem von der Kommission der EU geförderten Projekt in ihrem Abschlussbericht, dass für jeden in Deutschland für messtechnische Forschung und Entwicklung investierten Euro das Brutto sozialprodukt um etwa 4 Euro wächst. Sie beschreibt dies mit einem Nutzen zu Kosten Faktor $N/K \approx 4$ für Deutschland (Vergleich für die EU: $N/K \approx 2,7$).

a specific program of the BMWi. New projects have been approved, which all deal with the industrial exploitation of the expected research results by the enterprises involved.

These projects are pursued intensively in close cooperation not only with large companies but also, and especially, with small and medium-sized enterprises from the most different branches of industry. First results are expected for the coming year.

For the PTB, metrology for economy is not a one-way road by which metrological findings and procedures as well as other conventional methods of science are made known. These measuring techniques are an area of work in which the PTB – together with the German and European industry – increasingly pursues the practical use of research results for innovations.

An innovation which proved to be most successful as it created new jobs in a medium-sized enterprise took place in the field of coordinate measuring technology by the development of a so-called fibre probe for the mechanical-optical tracing of components from microsystem technology and miniaturized parts of macroscopic components (e.g. injection nozzles for car engines).

Such examples of cooperation between science and industry in the field of metrology sum up in Germany to an overall economic result which is above average in Europe. In its final report on a project funded by the European Commission, the University of Oxford states that for each euro invested in Germany in metrological research and development, the gross national product increases by approx. four euro, and gives a benefit/cost factor for Germany of ≈ 4 (compared to $\approx 2,7$ in the EU).

Metrologie für die Gesellschaft

In weiten Bereichen des täglichen Lebens besteht ein besonderes öffentliches Interesse an richtigen Messergebnissen und zuverlässigen Messeinrichtungen. In diesem Geschäftsbereich ist es Aufgabe der PTB (Mission), „Messtechnik und -verfahren zum angemessenen Schutz der Verbraucher im geschäftlichen und amtlichen Verkehr, der arbeitenden Bevölkerung im beruflichen Umfeld, zum Erhalt und der Wiederherstellung der Gesundheit, für die persönliche und industrielle Sicherheit sowie zum Schutz der Natur und Umwelt“ zur Verfügung zu stellen und einzusetzen. Ein Schwerpunkt in diesem Bereich ist noch die Bauartzulassung bzw. Prüfung von Messgeräten im Rahmen nationaler oder europäischer Rechtsvorschriften, zum Beispiel auf den Gebieten

- Energiemesstechnik für elektrische Energie, Gas und Wasser (Wärme, Kälte)
- Sicherheit im Straßenverkehr (Geschwindigkeitsüberwachung, Atemalkohol)
- Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)
- Umweltmesstechnik (Absolutmessungen in der Schadstoff- und Spurenanalyse, Lärmschutz etc.).

Der Erhalt bzw. die Wiederherstellung der Gesundheit der Bürger ist ein elementares Bedürfnis der Gesellschaft. Die PTB ist gemäß Medizinproduktegesetz zuständig für die Sicherstellung der Einheitlichkeit des Messwesens in der Medizin. Sie leistet hierzu durch die Bereitstellung eines hochentwickelten und zuverlässigen Messwesens für die Medizin einen entscheidenden Beitrag. Dazu zählen zum einen die Entwicklung neuer oder die Verbesserung bereits existierender Messverfahren für Diagnostik und Therapiekontrolle. Zum anderen leistet die PTB entscheidende Beiträge durch Entwicklung von Normalen und Normalmesseinrichtungen, beispielsweise für die Dosimetrie ionisierender Strahlung, die Ultraschall-Diagnostik, für medizinische Geräte mit Messfunktion sowie durch Arbeiten zur Rückführung von analytischen Messungen in der klinischen Chemie auf die SI-Einheiten, insbesondere auf das Mol.

Metrology for society

In wide areas of everyday life, the public has a great interest in correct measurement results and reliable measuring facilities. In this area, it is the task of the PTB (its mission) “to make available, and use, measuring techniques and procedures for the reasonable protection of the consumers in commercial and official transactions and of the active population in their job environment, for the conservation and restoration of health, for personal and industrial security as well as for the conservation of nature and the protection of the environment”. One focus in this area still is the type approval and examination of measuring instruments under national or European law, for example in the fields of

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

The conservation and restoration of the citizens' health is an elementary need of society. Under the Medical Devices Act, the PTB is responsible for safeguarding the uniformity of measurement in medicine to which it makes an important contribution by providing a highly developed and reliable metrology system. This contribution encompasses not only the development of new, or the improvement of existing, measurement methods for diagnostics and therapy control and the production of standards and standard measuring devices, for example for the dosimetry of ionizing radiation, ultrasound diagnostics, medical devices with a measuring function but also activities to trace back analytical measurements in the field of clinical chemistry to the SI units and the mole in particular.

In agreement, and in cooperation, with the *Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung* (BAM), the PTB pursues activities in the fields of physical safety engineering and explosion protection for electrical equipment, which are of economic and, above all, social importance. Due to its competence, it here fulfils an international reference function. The same applies to the work in the field

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

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

of radiation protection. Here the PTB has acquired key competence which goes far beyond the activities under verification law and is recognized and used both on the national and on the international level.

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

Internationale Angelegenheiten

Mit der Gründung der Meterkonvention vor 125 Jahren 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 (Mission), „zur internationalen Einheitlichkeit des Messwesens und damit zum Abbau nicht tarifärer Handelshemmnisse beizutragen“. Hierzu dienen Kooperationen mit anderen nationalen Metrologieinstituten, maßgebliche Mitarbeit in den internationalen Gremien und technisch-ökonomische Zusammenarbeit mit Entwicklungs- und Schwellenländern.

Wesentliches Element der Kooperation mit Partnerinstituten sind internationale „Key Comparisons“ von Normalen und Normalmesseinrichtungen und sich daraus ableitende F&E-Arbeiten, z. B. zur Entwicklung von Algorithmen für die Auswertung dieser Vergleiche. Im Rahmen der in jüngster Zeit abgeschlossenen internationalen Abkommen zur gegenseitigen Anerkennung von Messergebnissen und Zertifikaten der nationalen Metrologieinstitute und der akkreditierten Prüf- und Kalibrierlaboratorien kommt diesen Vergleichen besondere Bedeutung zu.

Die weltweite Angleichung von Anforderungen und Prüfvorschriften im gesetzlichen Messwesen dient dem Abbau nichttarifärer Handelshemmnisse und damit der exportorientierten deutschen Messgeräteindustrie. Mit diesen Zielen arbeitet die PTB aktiv in OIML und WELMEC mit. Ein internationales Abkommen zur gegenseitigen Anerkennung von Bauartprüfungen ist in Vorbereitung. Bis zum Inkrafttreten unterstützt die PTB die Wirtschaft mit bilateralen Abkommen.

Die Anforderungen an die Metrologie werden in Zukunft sowohl vom Umfang als auch von der Komplexität her stetig wachsen, so dass ein einzelnes Institut nicht sämtlichen Ansprüchen auf Dauer genügen kann. Koordination und Kooperation bei F&E und Dienstleistungen sind daher unumgänglich. Dies gilt weltweit und in besonderem Maße für Europa.

International Affairs

With the foundation of the Metre Convention 125 years ago, it had been demonstrated at the highest level that metrology is a matter to be pursued within an international framework. Due to the increasing globalization of economy and trade, this task has considerably gained in importance in the last few years. In the field “International Affairs”, it is the task of the PTB (its mission) “to contribute to the international uniformity of metrology and thus to removing non-tariff barriers to trade”. To carry out this task, it cooperates with other national metrology institutes, makes substantial contributions to the work of international bodies and cooperates both in the technical and in the economic field with developing and newly industrialized countries.

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

The global harmonization of requirements and testing regulations in legal metrology serves to remove non-tariff barriers to trade and thus the export-oriented German measuring instrument industry. With these objectives, the PTB actively cooperates in the OIML and in the WELMEC. An international agreement on the mutual recognition of type examinations is being prepared. Until it enters into force, the PTB supports the economy with bilateral agreements.

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

Die PTB wird bei der Entwicklung und Gestaltung der europäischen und globalen Metrologie weiter eine führende Rolle einnehmen und ihre Erfahrungen aus den nationalen Netzwerken einbringen. Dabei werden die Pläne der Europäischen Kommission zur Gestaltung der europäischen Forschungslandschaft einbezogen und umgesetzt. So organisiert die PTB im Rahmen der EU-geförderten Studie „Metrologie im europäischen Forschungsraum“ im Juni 2003 in Berlin einen internationalen Workshop mit Teilnehmern aus 34 europäischen Ländern. Die PTB arbeitet maßgeblich in allen internationalen Metrologieorganisationen mit, zu einem erheblichen Teil in leitender Funktion. Die PTB betrachtet dies als unverzichtbaren Beitrag zur Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Wirtschaft und Wahrung der Interessen und Bedürfnisse der Gesellschaft. Voraussetzung für die erfolgreiche Mitarbeit in allen Organisationen ist die in der praktischen Arbeit erworbene wissenschaftlich-technische Kompetenz der PTB und ihrer Mitarbeiter.

Die PTB leistet einen wesentlichen Beitrag zur internationalen Normung durch Mitarbeit in Gremien von ISO, IEC, CEN, CENELEC. Im Jahre 2002 war sie in 311 Vorhaben eingebunden. Die PTB sieht dies als wichtige Aufgabe im Dienste der Gesellschaft und Wirtschaft an.

Einen erheblichen Umfang nimmt die Technische Zusammenarbeit mit Entwicklungs- und Schwellenländern ein. Die PTB gibt ihre Erfahrungen weiter und leistet aktive Hilfe beim Aufbau der technischen Infrastruktur für die Metrologie sowie für das Normen-, Prüf- und Qualitätswesen einschließlich der Akkreditierung und der Zertifizierung. Die finanziellen Mittel werden überwiegend vom *Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (BMZ)* sowie weiteren nationalen und internationalen Gebern, wie der EU und der Weltbank, zur Verfügung gestellt. Im Jahr 2002 wurden 15 Länder in vier Kontinenten durch 24 bilaterale Projekte beim Aufbau ihrer technischen Infrastruktur allein aus Mitteln des BMZ unterstützt.

The PTB will continue to play a leading role in the development and shaping of the European and global metrology system and profit from the experience it has gained in national networks. The plans of the European Commission for the shaping of the European research landscape will be included and put into practice. The PTB will thus organize an international workshop within the scope of the EU-funded study “Metrology in the European Research Area” in Berlin in June 2003, with participants from 34 European countries. The PTB is substantially involved in all international metrology organizations, for a considerable part in leading functions. It considers this to be an indispensable contribution to assuring the competitiveness of the German economy and to safeguarding the interest and needs of society. A prerequisite for successful cooperation in all organizations is the scientific and technical competence the PTB and its employees have acquired within the scope of their practical work.

The PTB makes also a substantial contribution to international standardization by cooperating in bodies of ISO, IEC, CEN and CENELEC. In 2002, it was integrated in 311 projects. The PTB sees this as an important task in the service of society and economy.

Great importance is attached to technical cooperation with developing and newly industrialized countries. The PTB passes on its experience and lends active support in the setting-up of the technical infrastructure for metrology as well as for standardization, testing and quality assurance, including accreditation and certification. The funds are provided chiefly by the *Federal Ministry for Economic Cooperation and Development (BMZ)* and other national and international donors such as the EU and the World Bank. In 2002, 15 countries on four continents were assisted by 24 projects in setting up their technical infrastructure from BMZ funds alone.

Nachrichten

Neue Kraftmesseinrichtung von 10 mN bis 10 N

Im Zeitalter der Mikrosystemtechnik und Nanotechnologie wird die Rückführung kleinster Kräfte im mN- und μ N-Bereich auch von der Industrie gefordert. Für diese Aufgabe ist eine neue Kraftmesseinrichtung aufgebaut worden, die in einem ersten Schritt den z. B. für Mikrohärteprüfungen interessanten Bereich von 10 mN bis 10 N abdeckt und im oberen Bereich den Vergleich mit vorhandenen Kraft-Normalmesseinrichtungen nach dem Prinzip der direkten Massewirkung erlaubt.

Die Messeinrichtung besteht im Wesentlichen aus einer piezoelektrischen 1-d-Feinverstellung und einer präzisen elektrodynamischen Kompensationswaage. Ein zu untersuchender Kraftaufnehmer wird zwischen Waage und Feinverstelleinrichtung positioniert. Verfährt die Feinverstelleinrichtung nach unten, wird über den Kraftaufnehmer die Waagschale nach unten gedrückt. Das Kompensationsprinzip der Waage erzeugt durch Kraftwirkung auf eine stromdurchflossene Spule eine Gegenkraft und regelt damit auf die ursprüngliche Lage zurück. Der kraftproportionale Spulenstrom ist Messgröße der Waage.

Die elektrodynamische Kompensationswaage erlaubt die Messung von Gewichtskräften bis ca. 12 N mit einer Auflösung von 10 μ N. Die Feinverstellung ermöglicht Verschiebung bis 100 μ m mit einer Auflösung von 1 nm und eine Wiederholpräzision der Position von ± 5 nm.

Neue Kraftmesseinrichtung

New force measuring device from 10 mN to 10 N

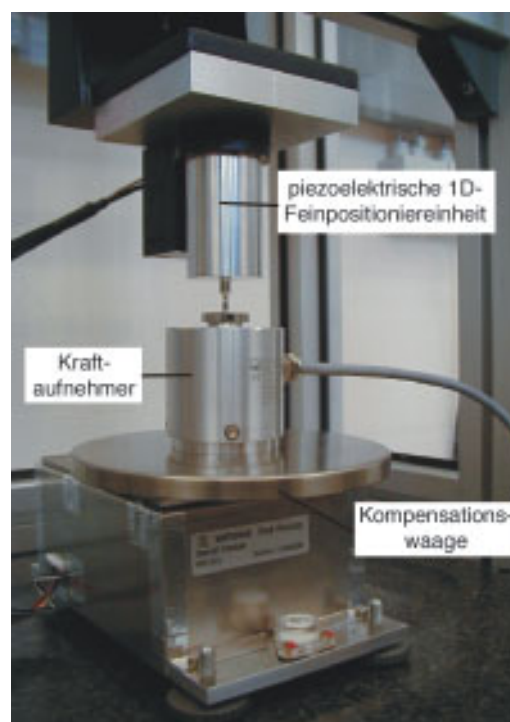
In the age of microsystem technology and nanotechnology, traceability of smallest forces in the mN and μ N range is also demanded by industry. For this task, a new force measuring device has been set up. In a first step, it covers the range from 10 mN to 10 N, which is of interest for example for micro hardness tests, and in the upper region it allows the comparison with existing force standard machines by the principle of the deadweight effect.

The measuring device essentially consists of a piezoelectric 1d precision displacement device and a precise electrodynamic compensating balance. The force transducer to be investigated is positioned between balance and precision displacement device. When the latter moves downwards, the load receptor is pressed downwards via the force transducer. By the exertion of force on a current-carrying coil, the compensation principle of the balance generates a counterforce, thus re-establishing the original position. The coil

current, which is proportional to the force, is the measurand of the balance.

The electrodynamic compensating balance permits weight forces up to approx. 12 N to be measured with a resolution of 10 μ N. The precision displacement device allows displacement by up to 100 μ m, with a resolution of 1 nm and a repeatability of the position of ± 5 nm.

New force measuring device



n des

Bundestagswahlen mit PTB-geprüften Wahlgeräten

Erstmals bei einer Bundestagswahl wurden am 22. September 2002 softwaregesteuerte, elektronische Wahlgeräte in verschiedenen Städten und Gemeinden rechtsverbindlich eingesetzt. Zuvor waren solche Geräte bereits bei einigen Landtags- und Kommunalwahlen zum Einsatz gekommen. Ähnliche Wahlgeräte wurden ebenso bei den irischen Parlamentswahlen im Mai 2002 eingesetzt.

Die Baumuster der Wahlgeräte waren zuvor in der PTB gründlich geprüft worden. Auch die irische Regierung stützte sich bei ihrer Entscheidung auf ein Prüfgutachten der PTB. Bei den Softwareprüfungen, die stets einen großen Anteil der Prüftätigkeit ausmachen, wurde ein Maßstab angelegt, der bei Software in hochkritischen Einsatzbereichen üblich ist.

Die PTB hat im Bereich der Prüfung von elektronischen Wahlsystemen ein erhebliches Erfahrungspotential aufgebaut. Damit ist sie in der Lage, zur Entwicklung zukünftiger elektronischer Wahlsysteme substantiell beizutragen.

PTB-geprüfte Wahlgeräte der Firma NEDAP beim Einsatz in einem irischen Wahllokal (Quelle: NEDAP)

PTB-tested voting machines of NEDAP make in use at an Irish polling station (source: NEDAP)

Elections to the German Parliament using PTB-tested voting machines

In the elections to the German Parliament on September 22, 2002, several towns and communities employed software-controlled electronic voting machines for the first time by with legally binding effect. Before this date, such machines had already been used in some federal state and local elections. Similar voting machines were also used in the elections to the Irish Parliament in May 2002.

The patterns of the voting machines had before been thoroughly tested at the PTB. Likewise, the decision of the Irish government was based on a test report made out by the PTB. In the software tests, which always account for a large amount of the total test work, the standard usually applied in most critical areas of application was employed.

In the testing of electronic voting machines, the PTB has built up a considerable potential of experience and is thus able to make a substantial contribution to the development of future electronic voting systems.



Neues, genaueres Dichtenormal der PTB

Die PTB kalibriert Festkörper-Dichtenormale für andere Laboratorien, insbesondere auch für viele Staatsinstitute. Die bisherige Volumenbestimmung der Silizium-Kugel Si2, die als internes Dichtenormal verwendet wird, gelingt mit einer relativen Dichte-Unsicherheit von $1,4 \cdot 10^{-6}$ (alle Unsicherheiten für einen Erweiterungsfaktor $k = 2$). Dagegen können mit Hilfe der Druckflotations-Apparatur in Zukunft Silizium-Dichtenormale anderer Staatsinstitute mit relativen Unsicherheiten von ca. $3 \cdot 10^{-7}$ angeschlossen werden.

Um das Dichtenormal genauer an Meter und Kilogramm anzuschließen, wurden mit einem neu entwickelten Kugelinterferometer mehr als 16 000 Einzeldurchmesser der Kugel Si2 gemessen. Ellipsometrische Untersuchungen der Oxidschicht der Kugel führten zu einem sehr genauen Wert der Oxidschichtdicke. Auf diese Weise konnte das Volumen der Kugel (bei 20 °C und 101 325 Pa) mit einer relativen Unsicherheit von $1,9 \cdot 10^{-7}$ bestimmt werden.

$$V(\text{Si2}) = (374,260\ 131 \pm 0,00\ 0072) \text{ cm}^3.$$

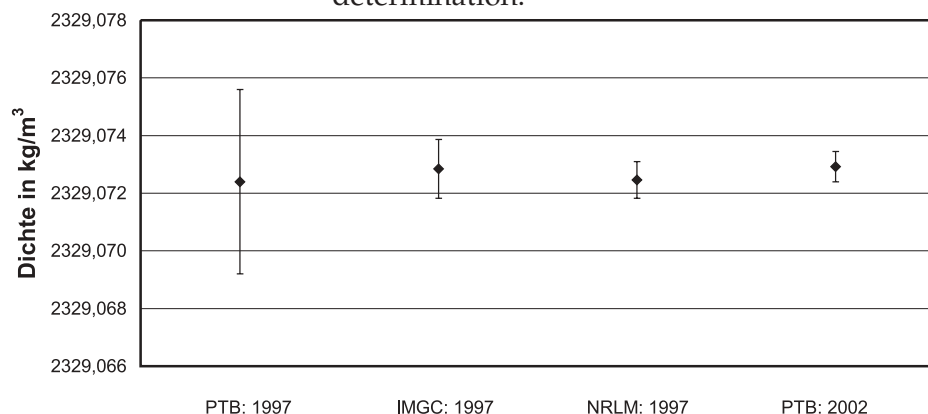
Der Anschluss an das Kilogramm wurde mit einer relativen Unsicherheit von $1,1 \cdot 10^{-7}$ durchgeführt, so dass die Dichte der Kugel (bei 20 °C und 101 325 Pa) mit einer relativen Unsicherheit von $2,2 \cdot 10^{-7}$ bekannt ist:

$$\rho(\text{Si2}) = (2\ 329,072\ 92 \pm 0,000\ 52) \text{ kg/m}^3.$$

Dieser Wert stimmt nicht nur sehr gut mit dem Wert der früheren Kalibrierung überein, sondern auch mit den Werten, die in einem internationalen Vergleich mit Hilfe von interferometrischen Volumenbestimmungen erhalten wurden.

Dichtebestimmungen der Silizium-Kugel Si2

Density determinations of the silicon sphere Si2



New PTB density standard of higher precision

The PTB's Density Section calibrates solid-state density standards for other laboratories and for many state institutes in particular. So far, the volume determination for the silicon sphere Si2 which is used as internal density standard has been possible with a relative density uncertainty of $1,4 \cdot 10^{-6}$ (all uncertainties for a coverage factor $k = 2$). By means of the pressure flotation apparatus, however, it will be possible in future to link up silicon density standards of other state institutes with relative uncertainties of approx. $3 \cdot 10^{-7}$.

To more precisely link up the density standard with the meter and the kilogram, more than 16 000 single diameters of the sphere Si2 were measured with a newly developed interferometer for spheres. Ellipsometric examinations of the sphere's oxide layer yielded a very precise value for the thickness of the oxide layer. In this way, the volume of the sphere (at 20 °C and 101 325 Pa) could be determined with a relative uncertainty of $1,9 \cdot 10^{-7}$.

$$V(\text{Si2}) = (374,260\ 131 \pm 0,000\ 072) \text{ cm}^3.$$

The link-up with the kilogram was carried out with a relative uncertainty of $1,1 \cdot 10^{-7}$ so that the density of the sphere (at 20 °C and 101 325 Pa) is known with a relative uncertainty of $2,2 \cdot 10^{-7}$:

$$\rho(\text{Si2}) = (2\ 329,072\ 92 \pm 0,000\ 52) \text{ kg/m}^3.$$

This value agrees very well not only with the value from the previous calibration but also with the values obtained in an international comparison by interferometric volume determination.

Ultrapräzise Ebenheitsmessung

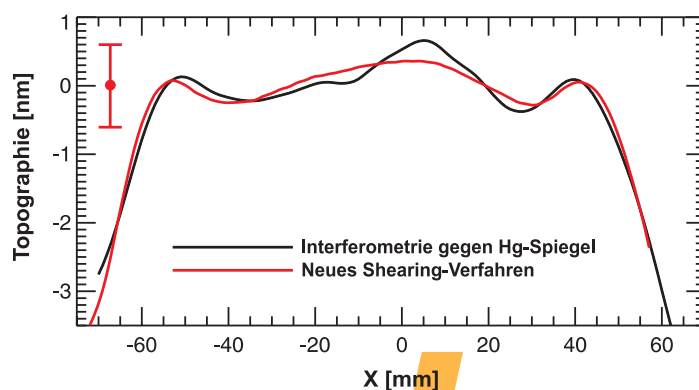
In der PTB wurde eine neue Apparatur entwickelt, mit der Formabweichungen einer optischen Fläche von einer idealen Ebene mit wenigen Atomdurchmessern Messunsicherheit bestimmt werden können, ohne auf einen externen Ebenheitsstandard zurückgreifen zu müssen.

Das neuartige Verfahren kombiniert erstmals Winkelmessungen und die Shearing-Methode. Dabei werden Reflexionswinkel an Orten auf der Prüflingsoberfläche gemessen, die einen konstanten Abstand von einigen Millimetern bis Zentimetern besitzen, und die Differenzen ermittelt. Diese werden dann mit eigens hierfür entwickelten mathematischen Algorithmen ausgewertet.

Bisher dient ein Quecksilberspiegel in der PTB als nationaler Ebenheitsstandard. Das neue Verfahren stellt neben Flüssigkeitsspiegeln und dem bekannten Dreiplattentest einen prinzipiell unabhängigen Zugang zum Problem der Ebenheitsmessung dar und ist erheblich genauer. Es nutzt die geradlinige Ausbreitung des Lichts als natürliche Geradheitsreferenz. Die Messgrößen, aus denen die Topographie unter Zuhilfenahme der mathematischen Algorithmen gewonnen wird, können auf die SI-Einheiten Länge und Winkel zurückgeführt werden.

Ein vorläufiger Vergleich von Messungen mit dem neuen Verfahren und interferometrischen Messungen gegen den Quecksilberspiegel der PTB ergab systematische Abweichungen kleiner 0,3 nm rms bei einer Länge der Schnitte von 130 mm. Die neue Anlage besitzt daher das Potenzial, zukünftig als ultrapräzises Primärnormal für Geradheit und Ebenheit mit einer Messunsicherheit im Sub-nm-Bereich zu dienen und den Quecksilberspiegel abzulösen.

Vergleich der gemessenen Form einer besonders ebenen Platte mit der neuen Anlage zur Ebenheitsmessung mit dem Shear-Verfahren (rot) und dem Quecksilberspiegel als Ebenheitsnormal (schwarz).



Comparison of the measured form of a very flat plate with the new facility for flatness measurement by the shearing method (red) and the mercury level as the flatness standard (black).

Ultraprecise flatness measurement

In the PTB, a new facility has been developed allowing deviations in the form of optical surfaces from an ideal plane to be determined with a measurement uncertainty of only a few atomic diameters without having to resort to an external flatness standard.

This novel method for the first time combines angular measurements and the shearing method. Angles of reflection are measured at locations on the sample surface with a constant spacing of a few millimeter to centimeter, and the differences are determined. These are then analyzed using mathematical algorithms specifically developed for this purpose.

So far, a mercury level has been used as the national flatness standard at the PTB. Apart from liquid levels and the well-known three-plate test, the new method is in principle an independent approach to the problem of flatness measurement and, at the same time, much more precise. The rectilinear propagation of light serves as natural straightness reference. The measurands from which the topography is obtained with the aid of the mathematical algorithms can be traced back to the SI units of length and angle.

A preliminary comparison between measurements carried out by the novel method and interferometric measurements against the mercury level of the PTB showed systematic deviations smaller than 0,3 nm rms for sections 130 mm long. The new facility therefore has the potential not only to serve as an ultraprecise primary standard for straightness and flatness with a measurement uncertainty in the sub-nm region but also to replace the mercury level.

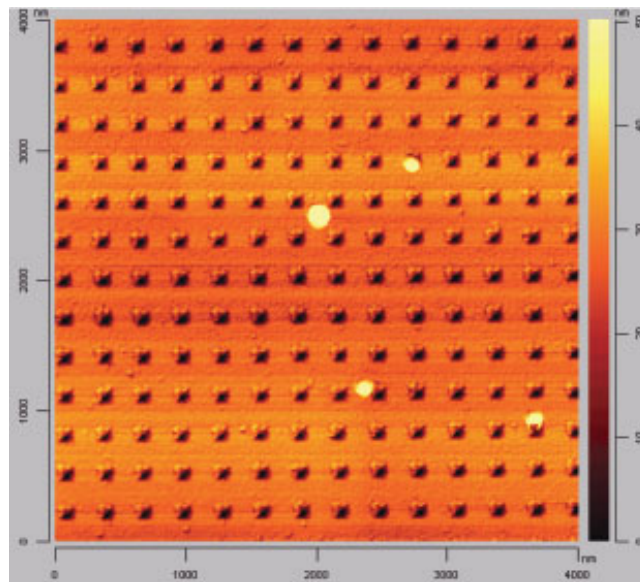
Gitternormale für die Nanotechnologie

Im Bereich der Nanotechnologie steigen die Anforderungen an höchstauflösende mikroskopische Mess- und Bildgebungsverfahren. Unter anderem steht die Bestimmung der Vergrößerung sowie der Bildverzerrungen im Vordergrund. Hierfür werden nanoskalige Normale hoher Qualität mit geeigneten Messstrukturen benötigt.

Eine besondere Herausforderung stellt die messtechnische Charakterisierung von Gitternormalen mit Strukturabständen von nur noch wenigen 100 nm dar. Das Bild zeigt eine AFM-Abbildung eines Teilbereiches eines Silizium-Normals mit Strukturabständen von 300 nm, welches bereits früher im Rahmen eines Europäischen Projektes durch lithographische Verfahren hergestellt wurde. Die strukturierte Fläche des Normals beträgt $100\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$.

Sowohl die Bestimmung des mittleren Strukturabstandes bzw. Teilungsschrittes dieses Gitternormals als auch der lokalen Positionsabweichungen im Gitter wurde mit dem Elektronenoptischen Metrologiesystem (EOMS) durchgeführt. Dieses Vakuum-Messsystem kombiniert die hohe Auflösung eines Elektronenmikroskopes mit interferometrischer Positionsbestimmung des Messobjektes in der x-y-Ebene. Für den mittleren Strukturabstand lassen sich Messunsicherheiten von unter 0,1 nm erzielen. Vergleichsmessungen mit integral optisch messenden, diffraktometrischen Methoden an Gitternormalen mit 300 nm Strukturabstand zeigten maximale Abweichungen für den mittleren Strukturabstand von weniger als 60 pm. Im Unterschied zu integralen Methoden lassen sich darüber hinaus mit dem EOMS auch lokale Abweichungen von einer nahezu idealen Struktur des Gitters bestimmen.

AFM-Bild eines 2-D-Gitternormals mit einem nominellen Strukturabstand von 300 nm



Grating standards for nanotechnology

In the field of nanotechnology, the requirements for microscopic measuring and imaging methods with highest resolution increase. In addition, the determination of magnification and image distortions is also a matter of priority. For this purpose, high quality nano-scale standards with suitable measurement structures are needed.

A special challenge is the metrological characterization of grating standards with structural spacings of a few 100 nm only. The figure shows the AFM image of a partial region of a silicon standard with structural spacings of 300 nm which had already been lithographically fabricated at an earlier date within the scope of a European project. The structured area of the standard is $100\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$.

The determination of both the mean structural spacing and/or interval of this grating standard and the local positional deviations in the grating was carried out with the electron-optical metrology system (EOMS). This vacuum measurement system combines the high resolution of the electron microscope with the interferometric positional determination of the object to be measured in the x-y plane. For the mean structural spacing, measurement uncertainties below 0,1 nm can be achieved. Comparison measurements with integral-optical diffractometric measuring methods on grating standards with a structural spacing of 300 nm showed maximum deviations for the mean structural spacing of less than 60 pm.

Furthermore, unlike integral methods, EOMS also allows to determine local deviations from an almost ideal grating structure.

AFM image of a 2D grating standard with a nominal structural spacing of 300 nm

Elektronenspinresonanz-Spektrometer

In der PTB wurde ein Elektronenspinresonanz(ESR)-Spektrometer in Betrieb genommen. Das Messprinzip beruht auf dem Nachweis strahlungsinduzierter freier Radikale in Alanin. Als Maß für die Dosis dient die massenbezogene ESR-Amplitude. Im therapeutisch relevanten Dosisbereich von etwa 1 Gy bis 10 Gy wird eine relative Standardmessunsicherheit von weniger als 0,5 % angestrebt. Ein großer Vorteil des Messverfahrens liegt in der geringen Ausdehnung der zylindrischen Sonden aus Alanin mit einem Volumen von nur wenigen mm³. Dies ermöglicht eine zuverlässige Dosimetrie auch in kleinen und unregelmäßig geformten Strahlungsfeldern, wie sie in zunehmendem Umfang in der Strahlentherapie eingesetzt werden.

Der im Aufbau befindliche Messplatz besteht aus einem rechnergesteuerten ESR-Spektrometer und einem hochempfindlichen Resonator, der mit einer in der PTB gefertigten Positioniervorrichtung für Alanin-Dosimetersonden ausgerüstet wurde. Nach der Installation des Spektrometers Ende 2001 wurden umfangreiche Untersuchungen zur Optimierung der Spektrometer-Grundeinstellungen durchgeführt. Dazu gehören Untersuchungen zum Einfluss äußerer klimatischer Bedingungen auf die Stabilität der ESR-Amplitude von bestrahlten Alanin-Sonden. Um die angestrebten Messunsicherheiten zu erzielen, wird gegenwärtig eine Referenzprobe entwickelt, mit deren Hilfe ein Großteil der apparativen Einflüsse des Spektrometers auf die ESR-Amplitude eliminiert werden kann.

Elektronenspinresonanz-Spektrometer mit Probenhalter

Electron spin resonance spectrometer

In the PTB, an electron spin resonance (ESR) spectrometer was put into service. The measurement principle is based on the fact that ESR allows evidence of radiation-induced free radicals in alanine to be given. As a measure of the dose serves the mass-related ESR amplitude; in the therapeutically relevant dose range of approx. 1 Gy to 10 Gy, a relative standard measurement uncertainty below 0,5 % is aimed at. It is a great advantage of this measuring method that, with a volume of only a few mm³, the size of the cylindrical alanine probes is very small. This allows reliable dosimetry also in small and irregularly formed radiation fields as are increasingly used in radiation therapy.

The measurement set-up currently under construction consists of a computer-controlled ESR spectrometer and a highly sensitive resonator which was equipped with a PTB-built positioning device for alanine dosimeter probes. After installation of the spectrometer at the end of 2001, extensive investigations were carried out to optimize the basic spectrometer settings. They include investigations of the influence of exterior climatic conditions on the stability of the ESR amplitude of irradiated alanine probes. To achieve the

measurement uncertainties aimed at, a reference sample is currently being developed which will help to eliminate a large part of the technical influences the spectrometer exerts on the ESR amplitude.

Electron spin resonance spectrometer with sample holder



EUV-Lithographie: Erste erfolgreiche Belichtung in Europa

Lithographie mit Strahlung einer Wellenlänge von 13,5 nm im extremen UV (EUV) ist das von der Halbleiterindustrie ausgewählte Verfahren zur Herstellung von Bauelementen mit Strukturbreiten von weniger als 50 nm ab etwa 2007. Die PTB unterstützt die europäische Industrie bei der Entwicklung der Komponenten und Messverfahren durch Bereitstellung und Entwicklung der benötigten „At-wavelength“-Metrologie.

In enger Kooperation mit der am 1. Oktober 2001 neu gegründeten *Carl Zeiss Semiconductor Manufacturing Technology AG* (SMT AG) wurde bei BESSY II eine Anlage aufgebaut, in der ein Prototyp einer Hochleistungs-EUVL-Projektionsoptik, das Micro Exposure Tool (MET), getestet wurde. Das MET, eine Schwarzschild-Projektionsoptik mit einer numerischen Apertur von 0,3, das die *Carl Zeiss SMT AG* in Kooperation mit dem *Lawrence Livermore National Laboratory*, USA, entwickelt hat, besteht aus zwei hochpräzisen asphärischen Mo/Si-Multilayer-Spiegeln. Als EUV-Strahlungsquelle diente der PTB-Undulator U180, der in seiner Strahlungsemission für den EUV-Bereich optimiert ist.

Im Februar des Jahres 2002 wurden mit dem MET zum ersten Mal in Europa Strukturen mit Breiten von nur 50 nm erzeugt. Damit wurde gezeigt, dass EUVL-Hochleistungs-optiken zur Herstellung von Mikrochips der übernächsten Generation verfügbar sind. Die internationale Vereinigung von Halbleiterherstellern, die SEMATECH, hat inzwischen eine MET-Optik für eine EUVL-Anlage zur Resistentwicklung bestellt.

Teststruktur mit Breiten von 50 nm, die im Photoresist mit dem MET durch „5 zu 1“-Verkleinerung der Strukturen einer Transmissionsmaske erzeugt wurden.

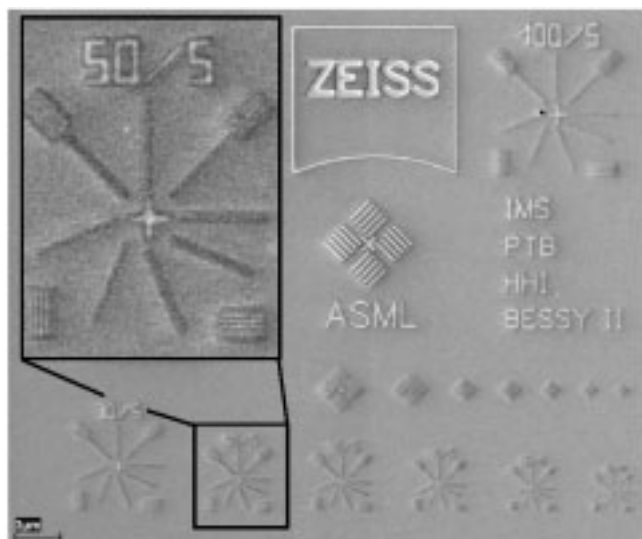
Test structure with widths of 50 nm fabricated with the MET in photoresist by 5 : 1 reduction of the transmission mask structures.

EUV lithography: first successful exposure in Europe

Lithography with radiation of a wavelength of 13,5 nm in the extreme UV (EUV) is the method the semiconductor industry has selected for the fabrication of components with structural widths of less than 50 nm for the time after about 2007. The PTB supports the European industry in the development of the components and measuring methods by providing and developing the “at-wavelength” methods required.

In close cooperation with the *Carl Zeiss Semiconductor Manufacturing Technology AG* (SMT AG) newly founded on October 1, 2001, a facility was set up at BESSY II in which a prototype of a high-efficiency EUVL projection optics, the Micro Exposure Tool (MET) was tested. The MET, a Schwarzschild projection optics with a numerical aperture of 0,3 which was developed by *Carl Zeiss SMT AG* in cooperation with the *Lawrence Livermore National Laboratory*, U. S., consists of two highly precise nonspherical Mo/Si multilayer mirrors. As EUV radiation source, the PTB undulator U180 was used whose radiation emission is optimized for the EUV range.

In February 2002, for the first time in Europe, structures with widths of 50 nm only were fabricated with the MET, thus showing that EUVL high efficiency optics are available for the production of microchips of the generation after next. The international association of semiconductor manufacturers, the SEMATECH, has meanwhile ordered an MET optics for an EUVL facility for resist development.



Vom Halbleiter-Atom zum Quantenpunkt-Molekül

Um einzelne Elektronen in Halbleiterstrukturen manipulieren zu können, dürfen die Abmessungen der aktiven Bereiche von Bauelementen nur wenige Nanometer betragen. Selbstorganisierte Halbleiter-Quantenpunkte eröffnen diese Möglichkeit, wenn sie in die Barriere einer resonanten Tunnelodiode eingebettet werden. Ein weiterer Selbstordnungs-Mechanismus, induziert durch Spannungsfelder im Kristall, sorgt nun dafür, dass sich diese Nanoinseln sogar übereinander anordnen. Mit dieser Technik ist es erstmals gelungen, resonante Tunneldioden mit zwei vertikal gestapelten Quantenpunkten aus Indiumarsenid herzustellen, die im Experiment verblüffende, neue Eigenschaften gezeigt haben.

In diesen Strukturen stellen die beiden gestapelten Quantenpunkte Emitter und Kollektor der Tunnelodiode dar, deren Strom-Spannungskennlinie durch sequentielle Tunnelprozesse bestimmt wird. Da die Quanteninseln ähnlich wie Atome 0-dimensionale Energiezustände besitzen, bilden sich in der Kennlinie keine Stufen, sondern scharfe Stromspitzen aus. Wie zu erwarten, zeigten diese keine thermische Verbreiterung, wie sie bei nicht-gestapelten Quantenpunkten beobachtet wird. Ursache dafür ist die sich nicht mehr auf den Tunnelprozess auswirkende Verschmierung der Fermikante im 3-dimensionalen Elektronensystem des hochdotierten Substrats.

Ein neuer Freiheitsgrad ergibt sich aus der Kopplung der beiden Nanoinseln. Werden die Barrieren dünner, nimmt die Kopplung zu, und im Extremfall werden die Elektronenwellen hybridisieren und quasi ein Quantenpunkt-Molekül bilden. Dies konnte tatsächlich in Zusammenarbeit mit der Universität Hannover mit Hilfe der Magnetfeldspektroskopie anhand eines veränderten g-Faktors gezeigt werden. Mit diesen Untersuchungen eröffnet sich auch eine Perspektive für Strukturen mit mehr als zwei vertikal gekoppelten Quantenpunkten.

Schematische Zeichnung (linke Bildhälfte) von zwei vertikal gekoppelten Halbleiter-Quantenpunkten (gelb) und Transmission-Elektronenmikroskop-Aufnahme einer resonanten Tunnelodiode mit gestapelten Quantenpunkten (rechte Bildhälfte)

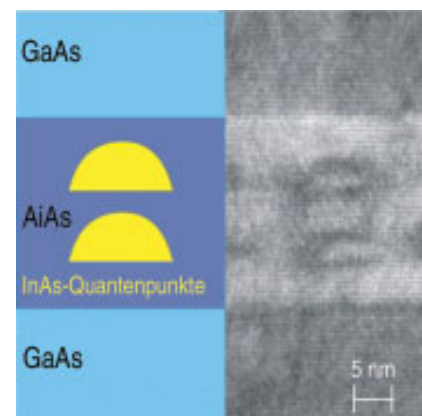
From the semiconductor atom to the quantum dot molecule

To manipulate single electrons in semiconductor structures, the dimensions of the active areas of components must amount to a few nanometre only. Here self-organized semiconductor quantum dots provide a solution if they are embedded into the barrier of a resonant tunnel diode. Another self-organizing mechanism, induced by voltage fields in the crystal, now leads to these nano-islands even building up above one another. With this technique, resonant tunnel diodes with two vertically stacked quantum dots of indium arsenide were successfully produced for the first time showing stunning new properties in the experiment.

In these structures, the two stacked quantum dots are the emitter and the collector of the tunnel diode whose current-voltage characteristic is determined by sequential tunneling processes. As the quantum islands, similar to atoms, possess 0-dimensional energy states, no steps but distinct current peaks show in the characteristic. As could be expected, unlike non-stacked quantum dots, these peaks showed no thermal broadening. The cause of this is the blurring of the Fermi level in the three-dimensional electron system of the highly doped substrate which no longer has an effect on the tunneling process.

A new degree of freedom derives from the coupling of the two nano-islands. When the barriers become thinner, the coupling increases and in the extreme case, the electron waves will hybridize and practically form a quantum dot molecule. This could actually be shown by magnetic field spectroscopy in cooperation with Hannover University from a modified g-factor. With these investigations, there are new prospects for structures with more than two vertically coupled quantum dots.

Schematic drawing (left half) of two vertically coupled semiconductor quantum dots (yellow) and transmission electron micrograph of a resonant tunnel diode with stacked quantum dots (right half)



Evaluation

Im November 2001 hatte das *Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie* (BMWi), jetzt *Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit* (BMWA), eine aus elf Fachexperten bestehende internationale Kommission unter Vorsitz von Prof. H. Weule (*Univ. Karlsruhe*) mit dem Auftrag berufen, eine umfassende Evaluation des Profils und der Qualität der Arbeiten der PTB durchzuführen.

Die Evaluierungsarbeit nahm das ganze Jahr 2002 in Anspruch. Neben drei Sitzungen und Begehungen der Kommission in der PTB im April, im August und im November und gezielter Einzelbesuche begutachteten zwei zusätzliche Unterkommissionen speziell die Bereiche „Metrologie in der Chemie“ und „Metrologische Informationstechnik“. Die dritte Sitzung Anfang November diente der Diskussion des Abschlussberichtes, der am 16. Dezember dem Bundeswirtschaftsminister Dr. Clement überreicht werden konnte. Der Abschlussbericht ist auf der Internetseite des BMWA und der Intranetseite der PTB veröffentlicht.

Insgesamt führte die Begutachtung durch die Kommission zu einer sehr positiven Bewertung der fachlichen Qualifikation und der Motivation der PTB-Mitarbeiter, die sich national und international in vielen Bereichen eine führende Stellung erarbeitet haben. Auf diese Bewertung ist die PTB stolz.

Die Mission der PTB als metrologisches Staatsinstitut wurde sehr unterstützt mit der Empfehlung, auch weiterhin die Arbeiten konsequent an dieser Mission auszurichten. Die Kommission erkannte, dass die auf die PTB zukommenden Aufgaben eine Erweiterung des fachlichen Spektrums erfordern werden. Dies, zusammen mit einem von der Kommission an manchen Stellen erkannten Modernisierungs- und Investitionsbedarf, führte zur Forderung nach einer Budgetaufstockung und einem Ende des jährlich 1,5-prozentigen Stellenabbaus.

Weitreichende Empfehlungen betrafen die Leitung der PTB (bezüglich Flexibilität und Autonomie des Präsidiums in Haushaltsfragen) sowie das Verhältnis zwischen Präsidium und Ministerium. So scheint der Kommission die Einführung eines Globalhaushaltes

Evaluation

In November 2001, the *Federal Ministry of Economics and Technology* (BMWi), now *Federal Ministry of Economics and Labour* (BMWA), had appointed an international commission of 11 experts under the chairmanship of Prof. H. Weule (*Karlsruhe University*) with the task of carrying out an extensive evaluation of the profile and quality of the PTB's work.

The evaluation work took the whole year 2002. Apart from three meetings and inspections of the PTB by the commission in April, August and November and selective individual visits, the areas "Metrology in chemistry" and "Metrological information technology" in particular were assessed by two subcommissions. The third meeting early in November served the discussion of the final report, which could be handed over to the Federal Minister of Economics, Dr. Clement, on December 16. The final report has been published on the Internet site of the BMWA and in the PTB's intranet.

All in all, the evaluation by the commission led to a very positive assessment of the technical qualification and commitment of the PTB staff which in many areas has acquired a leading position on the national and international level. The PTB can be proud of this assessment.

The PTB's mission as the national metrology institute was very much supported, with the recommendation that the activities should be continued consistently and in line with this mission. The commission was aware that the tasks coming up for the PTB will require an extension of the technical spectrum. This, together with a need for modernization and investment recognized by the commission for some areas, led to the claim that the budget should be increased and an end be put to the staff reductions of 1,5 % every year.

Far-reaching recommendations were given with respect to the management of the PTB as regards both the flexibility and the autonomy of the Presidential Board in budgetary questions and the relations between the Presidential Board and the Ministry. The commission seems to consider it necessary to introduce a global budget and, at the same time, to largely flexibilize the staff planning so



Die Mitglieder der Evaluationskommission (v. l. n. r.):
The members of the evaluation commission (from left to right):

Bernhard Athané, Dr. Terry Quinn, Prof. Dr. Alexander Bradshaw, Dr. Robert Kaarls, Prof. Dr. Detlev Ganten, Dr. Karen H. Brown, Prof. Dr. Karl Joachim Ebeling, Prof. Dr. Hartmut Weule, Dr. Ralf Christoph, Prof. Dr. Dr. Werner Martienssen – fehlt/missing: Dr. Günther Maaz

unter weitgehender Flexibilisierung des Stellenplans erforderlich, um dem Präsidium ausreichend Handlungsspielraum zu geben. Zur Steigerung der Autonomie des Präsidiums und zur Vereinfachung der Fachaufsicht des BMWA wurde empfohlen, eine Konstellation bestehend aus Vorstand und Aufsichtsrat zu bilden, wobei der Vorstand dem jetzigen Präsidium entsprechen und der Aufsichtsrat aus Vertretern des Ministeriums, der Wirtschaft und der Wissenschaft gebildet werden sollte.

Die Kommission empfahl, die strategische Ausrichtung der PTB, d. h. speziell die Auswahl der Aufgaben, noch systematischer als bisher an den Anforderungen aus Wirtschaft, Gesellschaft und Wissenschaft auszurichten und dafür entsprechende Prozesse einzurichten. Weitere Anliegen der Kommission waren die Einbindung der PTB in das nationale und internationale Forschungsumfeld sowie Kooperationen und Technologietransfer. Die Kommission erkannte an, dass sich die PTB in diesen Gebieten in einer guten Situation befindet, schlug aber vor, entsprechende Anstrengungen noch zu verstärken.

Bereits während des Evaluierungsprozesses waren von Seiten der PTB eine Reihe von Ideen ausgearbeitet worden, teils in Vorbereitung, teils in Reaktion auf Sitzungen der Kommission. Eine große Aufgabe für das Jahr 2003 wird sein, die Empfehlungen der Kommission mit den eigenen Vorstellungen in einem Gesamtkonzept zu verbinden und umzusetzen. Die Kommission hat angeboten, diesen Prozess weiterhin zu begleiten.

as to give the Presidential Board sufficient leeway. To increase the autonomy of the Presidential Board and to facilitate technical supervision by the BMWA, a constellation of Executive Board and Supervisory Board was recommended, whereby the Executive Board should be formed by the present Presidential Board and the Supervisory Board consist of representatives from the Ministry, from industry and science.

The commission recommended gearing the PTB's strategies, i. e. the selection of tasks in particular, more systematically to the requirements of industry, society and science and devising appropriate processes. Further issues of the commission were the integration of the PTB into the national and international research landscape, cooperation projects and technology transfer. The commission acknowledged that the PTB is in a good position in these fields but recommended further improving the respective activities.

Already during the evaluation process, a number of ideas had been worked out by the PTB, partly in preparation for, partly as a reaction to the meetings of the commission. A great task for 2003 will be to merge the recommendations of the commission and our own ideas into a single concept and implement this. The commission has offered to support this process also in the future.

53. Sitzung des Kuratoriums

Die 53. Jahrestagung des Kuratoriums der PTB fand am 7. und 8. März 2002 in Berlin statt. Am Vormittag des 7. März konnten die Mitglieder und Gäste des Kuratoriums ausgewählte Experimente und Messplätze in Fachlaboratorien der PTB besichtigen. Am Nachmittag folgte ein wissenschaftliches Kolloquium, in dem drei Wissenschaftler der PTB über aktuelle Forschungsergebnisse auf den Gebieten „Charakterisierung eines Ultraschallskalpell“, „Ultrakalte Atome für optische Atomuhren“ sowie „Simultane optische Nahfeld- und Rastermikroskopie“ berichteten. Im Anschluss fanden Fachgespräche in den Abteilungen statt.



Dr. Steiger erklärt Prof. Dr. Schoenes und Dipl.-Ing. R. von Siemens die Messung lokaler elektrischer Feldstärken in technologisch relevanten Plasmen.

Dr. Steiger explains to Prof. Dr. Schoenes and Dipl.-Ing. R. von Siemens the measurement of local electric field strengths in technologically relevant plasmas

Die Sitzung am 8. März fand erstmals im Hörsaal des Hermann-von-Helmholtz-Baus statt. Der Präsident des Kuratoriums, Dr. E. Röhling, berichtete u. a. über die Programme des BMWi zur Technologieförderung für den Mittelstand sowie über den Stand der Messgeräterichtlinie der EU. Der Präsident der PTB, Prof. Dr. E. O. Göbel, stellte in seinem Bericht für jeden der vier Geschäftsbereiche die Leistungen der PTB vor. Insbesondere informierte er über den Stand der Arbeiten im Avogadro-Projekt, die organisatorischen Änderungen für den Bereich der Akkreditierungsstelle des *Deutschen Kalibrierdienstes* sowie die Zusammenarbeit mit der Industrie im Rahmen der EUV-Lithographie. Weiterhin ging er auf die Personal- und Haushaltsentwicklung der PTB, auf das Programm zur

The 53rd Meeting of the Advisory Board

On March 7 and 8, 2002, the Advisory Board met for its 53rd annual meeting in Berlin. In the morning of March 7, the members and guests of the Advisory Board had the opportunity to inspect selected experiments and measuring set-ups at laboratories of the PTB. In the afternoon, a scientific colloquy followed at which three PTB scientists reported on recent research results in the fields of “Characterization of an ultrasonic scalpel,” “Ultra-cold atoms for optical atomic clocks” and “Simultaneous optical near field and scanning microscopy.” Afterwards, technical discussions were held at the divisions.

The meeting on March 8 took place for the first time at the lecture hall of the Hermann von Helmholtz Building. The President of the Advisory Board, Dr. E. Röhling, reported, among other things, on the programs of the BMWi with regard to the promotion of technology for small and medium-sized companies and on the state of the art of the EU Measuring Instruments Directive. In his report, the President of the PTB, Prof. Dr. E. O. Göbel, set out the achievements attained by the PTB in each of its four fields of activity. He informed about the progress made in the Avogadro Project in particular, the organizational changes envisaged for the Accreditation Body of the *Deutscher Kalibrierdienst* (German Calibration Service) and the cooperation with industry in EUV lithography. Furthermore, he outlined the staff and budget development at the PTB, the program to increase the



Dr. Richter erläutert Dr. Böhm, Dr. Siegel und Prof. Dr. Schoenes einen Versuchsaufbau im Bereich der Radiometrie mit Synchrotronstrahlung.

Dr. Richter explains to Dr. Böhm, Dr. Siegel and Prof. Dr. Schoenes a test set-up for radiometry with synchrotron radiation

Teilnehmer an der 53.
Kuratoriumstagung
Participants in the 53rd
Meeting of the Advisory
Board

Leistungssteigerung
der technisch-ökono-
mischen Infrastruktur
sowie auf die geplan-
te Straffung der
Organisationsstruktur
ein.

Das Kuratorium hat
Empfehlungen zur
Mitwirkung beim
Aufbau eines Satellitennavigations- und
-kommunikationssystems sowie zur Weiter-
führung des Projektes zur Neubestimmung
der Avogadro-Konstante verabschiedet. Die
geplante Evaluation der PTB wurde in einem
gesonderten Tagesordnungspunkt erörtert.
Vom Ergebnis der Evaluation werden eine
Stärkung der Rolle der PTB, die weitergehen-
de Flexibilisierung der Mittel sowie ein Ende
des Stellenabbaus erwartet. Im weiteren
Verlauf der Sitzung berichteten Dr. W. Buck
über das Arbeitsgebiet „Temperatur und
Synchrotronstrahlung“ sowie der Schatzmei-
ster des Helmholtz-Fonds e. V., Dipl.-Ing. R.
von Siemens, über die Entwicklung des
Fonds.

Das BMWi hat dem Vorschlag des Kuratori-
ums, den nach 25-jähriger Mitarbeit aus-
scheidenden stellvertretenden Präsidenten
des Kuratoriums, Prof. Dr. H.-G. Wagner, zum
Ehrenmitglied des Kuratoriums sowie Prof.
Dr. K. v. Klitzing zum neuen stellvertretenden
Präsidenten zu ernennen, entsprochen.

Persönliches:

Im Berichtsjahr schieden die Mitglieder
Dr.-Ing. H. Lennertz sowie Dipl.-Phys.
H. Schillo aus dem Kuratorium aus.

Als neues Mitglied des Kuratoriums wurde
Prof. Dr. Ch. P. Beckervordersandforth beru-
fen.



efficiency of the technical and economic
infrastructure and the planned tightening of
the organizational structure.

The Advisory Board adopted recommenda-
tions for cooperation in setting up a satellite
navigation and communication system and
for continuing the project on the re-deter-
mination of Avogadro's constant. The planned
evaluation of the PTB was discussed in a
separate item of the agenda. The evaluation is
expected to strengthen the role of the PTB,
to further flexibilize the funds and to end
downsizing. In the further course of the
meeting, Dr. W. Buck reported on his field of
work "Temperature and synchrotron
radiation" and Dipl.-Ing. R. von Siemens, the
treasurer of the Helmholtz-Fonds e.V., on the
development of this fund.

The BMWi has complied with the proposal of
the Advisory Board to appoint Prof. Dr. H.-G.
Wagner, Vice President of the Advisory Board
and retiring after 25 years of committed work,
Honorary Member of the Advisory Board,
and to appoint Prof. Dr. K. v. Klitzing new
Vice President.

Personal Data:

During the year under report, the members
Dr.-Ing. H. Lennertz and Dipl.-Phys.
H. Schillo retired from the Advisory Board.

As a new member of the Advisory Board,
Prof. Dr. Ch.P. Beckervordersandforth was
appointed.

Internationale Konferenz „IMEKO“

Neue Methoden und Geräte zur Messung von Kraft, Masse, Drehmoment und Härte sowie zur Überwachung von Bauwerken waren die Themen auf einer Konferenz der *Internationalen Messtechnischen Konföderation* (IMEKO) vom 24. bis 26. September in Celle. Die Veranstaltung wurde von der VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik, der Technischen Universität Braunschweig und der PTB organisiert.

Insgesamt stellten etwa 150 Fachleute aus 25 Ländern ihre Erfahrungen mit präzisen und zuverlässigen Messungen auf folgenden Themengebieten vor:

- Messung von Kraft, Masse, Drehmoment und Härte
- Neue Konzepte auf dem Gebiet der dynamischen Messungen und deren Umsetzung
- Mehrkomponenten-Verfahren zur Darstellung und Messung von Kraft und Drehmoment
- Neue Entwicklungen auf dem Gebiet der Wägetechnik
- Sensortechnologie und deren industrielle Anwendungen
- Kraft- und Drehmomentmessung im Mikro- und Nanobereich
- Akkreditierung von Laboratorien
- Messtechnik im Bauwesen mit Anwendungen bei der Bauwerksüberwachung.

Das Tagungsprogramm wurde ergänzt durch eine Geräteausstellung in- und ausländischer Hersteller von Messtechnik. An die Tagung schloss sich eine Besichtigung von PTB-Laboratorien in Braunschweig an.

IMEKO Conference

New methods and instruments for the measurement of force, mass, torque and hardness and for monitoring structures were the subjects of a conference of the *International Metrological Confederation* (IMEKO) held in Celle from September 24 to 26. The conference was organized by Mess- und Automatisierungstechnik, a VDI/VDE society, the Technical University of Braunschweig and the PTB.

About 150 experts from 25 countries presented their experience by accurate and reliable measurements in the following fields:

- measurement of force, mass, torque and hardness
- new concepts in the field of dynamic measurements and their implementation
- multi-component procedures for the realization and measurement of force and torque
- new developments in weighing technology
- sensor technology and its application in industry
- force and torque measurement in the micro and nano range
- accreditation of laboratories
- metrology in civil engineering and building construction with applications in the monitoring of structures.

The conference program was complemented by an exhibition of measuring instruments of German and foreign manufacturers. The conference ended with a visit to the PTB laboratories in Braunschweig.



Helmholtz-Symposium „Fühlen oder Messen?“

Messgeräte statt Sinnesorgane – kann das funktionieren? Wie lassen sich menschliche Sinneswahrnehmungen messend begleiten? Diese Fragen diskutierten am 29. Oktober beim diesjährigen Helmholtz-Symposium der PTB in Braunschweig verschiedene Wissenschaftler, die auf dem Gebiet der „künstlichen Sinnesorgane“ forschen.

So erläuterte Udo Weimar vom *Institut für Physikalische und Theoretische Chemie* von der *Universität Tübingen*, wie „elektronische Nasen“ funktionieren und ob sie wirklich schon „riechen“ können. Schon heute sind solche elektronischen Nasen sehr leistungsfähig, wenn es darum geht, Einzelsubstanzen in der Luft aufzuspüren. Beispielsweise bei der Qualitätskontrolle von Lebensmittelverpackungen könnte diese Technik ihr Potential ausspielen. Sind die Aufgaben jedoch komplexer, etwa bei einer Weinprobe, werden gleichzeitig auch die Grenzen dieser Technik deutlich.

Dem Thema „Riechen“ näherte sich auf ganz andere Weise die Marketingprofessorin Anja Stöhr von der *Hochschule für Technik und Wirtschaft* in Dresden. Sie sprach über „Air Design“ und erläuterte, ob der ausgewogene, kaum merkliche Vanilleduft im Supermarkt oder andere Duftkomponenten tatsächlich das Kaufverhalten beeinflussen und den Umsatz im Handel steigern.

Weitere Vorträge/further lectures:

Gerd Heinz (*Gesellschaft zur Förderung angewandter Informatik e. V.*, Berlin):

Akustische Photo- und Kinematographie

Friedrich Blutner (*Synotec GmbH*, Geyer/Erzgebirge):

Die Wiederentdeckung des Wohlklangs

Helmholtz Symposium “Sensing or Measuring?”

Measuring instruments instead of sensory organs – can that work? How can sensory perceptions of humans be accompanied by measurement? These questions were discussed by different scientists investigating the field of “artificial sensory organs” at this year's Helmholtz Symposium held at the PTB in Braunschweig on October 29.

At this symposium, Udo Weimar from the *Institute for Physical and Theoretical Chemistry of Tübingen University* explained the way “electronic noses” work and whether they are really capable of “smelling.” Electronic noses are already most efficient when it comes to detecting individual substances in the air. For example, this technology has a great potential for the quality control of food packages. However, as soon as the tasks get more complex, for example when tasting wine, the restraints on this technology become apparent.

The issue of “smelling” was approached from a

completely different angle by market researcher Anja Stöhr from the *Dresden College of Technology and Economics*. She lectured on “Air Design” and examined whether the balanced, hardly perceivable scent of vanilla in supermarkets or other fragrance components really influence the buying behaviour of customers and increase sales.



v. l. n. r.: Dr. Gerd Heinz, Prof. Dr. Anja Stöhr, Dr. Friedrich Blutner

Symposium zum Stand der Tieftemperaturphysik

Nach zehn Jahren veranstaltete die PTB wieder ein Symposium zur „Tieftemperaturphysik unterhalb von 1 Kelvin“ als 175. PTB-Seminar, dieses Mal gemeinsam mit dem Hahn-Meitner-Institut (HMI) Berlin. Anlass war der 15. Jahrestag der Gründung des gemeinsam von PTB, HMI und der Freien Universität organisierten „Berliner Tieftemperatur-Kolloquium“. Dieses Kolloquium hat zu einer engen Vernetzung der Beteiligten innerhalb Berlins, aber auch im nationalen und internationalen Rahmen geführt.

Über Anwendungen der Tieftemperatur-Technologie, Instrumentierung und Messtechnik berichteten Prof. G. Frossati (Kammerlingh-Onnes-Laboratorium, Leiden), Dr. H. Albrecht (Oxford Instruments) und Prof. G. Eska (Bayreuth). Dr. J. Fischer (PTB) schilderte den Weg zur Erweiterung der Temperaturskala zu tiefen Temperaturen bis 1 Millikelvin (PLTS-2000). Über die Eigenschaften von Gläsern bei tiefen Temperaturen und über fundamentale Phasenübergänge in diesem Bereich trugen Prof. R. Pohl (Ithaka), Prof. H. von Löhneysen (Karlsruhe) und Prof. S. Hunklinger (Heidelberg) vor.

Die abschließende Podiumsdiskussion zum Thema „Tieftemperaturphysik – quo vadis?“ ergab, dass Helium-3 als Modellsubstanz ein wichtiges Untersuchungsobjekt für neue Theorien bleibt. Verstärkt aufgegriffen werden sollten aber vor allem festkörperphysikalische Fragestellungen mit der Untersuchung neuer Materialien, beispielsweise für Quantencomputer und Photodetektoren. Der deutliche Vorsprung der PTB auf dem Gebiet der ultratiefen Temperaturen vor dem NIST muss dabei als Standortvorteil für die europäische Tieftemperaturforschung erhalten werden.

Teilnehmer am 175. PTB-Seminar „Tieftemperaturphysik unterhalb 1 K“ am 8. November 2002

Participants in the 175th PTB Seminar “Low Temperature Physics below 1 K” on November 8, 2002

Symposium on the state of the art of low temperature physics

After ten years, the PTB once again organized a symposium on “Low Temperature Physics below 1 Kelvin” as the 175th PTB Seminar, this time together with the Hahn-Meitner-Institut (HMI) in Berlin. The occasion was the 15th anniversary of the foundation of the “Berlin Low Temperature Colloquy” which is jointly organized by the PTB, the HMI and the Freie Universität Berlin. This colloquy has produced a close network grouping all participants not only in Berlin but also on the national and international level.

Prof. G. Frossati (Kammerlingh Onnes Laboratory, Leiden), Dr. H. Albrecht (Oxford Instruments) and Prof. G. Eska (Bayreuth) reported on applications of low temperature technology, instrumentation and metrology. Dr. J. Fischer (PTB) described the extension of the temperature scale towards temperatures as low as 1 millikelvin (PLTS-2000). Prof. R. Pohl (Ithaka), Prof. H. von Löhneysen (Karlsruhe) and Prof. S. Hunklinger (Heidelberg) lectured on the properties of glasses at low temperatures and on fundamental phase transitions in this range.

The final panel discussion entitled “Low temperature physics – quo vadis?” led to the conclusion that helium-3 as a model substance will remain an important object of investigation for new theories. More emphasis should be placed particularly on questions of solid body physics and the investigation of new materials, for example for quantum computers and photodetectors. The distinct lead of the PTB over the NIST in the area of ultra deep temperatures must be safeguarded as a locational advantage for European low temperature research.



„Berlin Neuroimaging Centre“

In einem zweistufigen Auswahlverfahren mit internationaler Begutachtung hat das BMBF in Deutschland fünf Zentren für Bildung in den klinischen Neurowissenschaften eingerichtet, eines dieser Zentren ist das *Berlin Neuroimaging Centre* (BNIC). Beantragt wurde dieses Zentrum unter der Federführung der *Humboldt-Universität Berlin*, gemeinsam mit der *Freien Universität Berlin* und der Abteilung 8 „*Medizinphysik und metrologische Informationstechnik*“ der PTB. Ziel dieser Zentren ist es, durch eine verbesserte Bildung des zentralen Nervensystems und durch die Integration verschiedener bildgebender Verfahren eine präzisere Lokalisation von Hirnfunktionen zu erreichen sowie die Ursachen neurologischer Defizite bei Erkrankungen zu ermitteln, um zu einer verbesserten Diagnostik sowie zu einer gezielteren Therapie und Rehabilitation neurologischer Krankheiten beizutragen. Schwerpunktmäßig ist das BNIC, welches im Juni 2002 seinen Betrieb aufgenommen hat, auf die Verbesserung der Schlaganfalldiagnostik sowie auf das bessere Verständnis der neurovaskulären Kopplung ausgerichtet. Die PTB beteiligt sich an diesem Zentrum mit den beiden Infrastrukturprojekten „*MR-Physik/MR-Messtechnik*“ und „*Biomagnetismus/Magnetenzephalographie*“ (MEG). Forschungs- und Entwicklungsarbeiten, die gemeinsam mit anderen Mitgliedern des Zentrums in diesen Infrastrukturprojekten durchgeführt werden, haben u. a. die Integration der funktionellen (3-Tesla)-Kernspintomographie und der Magnetenzephalographie mit der Nahinfrarot-Spektroskopie (NIRS) zum Ziel. Die PTB stellt ihre metrologische Infrastruktur auf dem Gebiet der medizinischen Messtechnik den übrigen Mitgliedern des Zentrums zur Verfügung und trägt durch ihre Erfahrung auf den Gebieten Messdatenerfassung, Signalverarbeitung, Datenanalyse und Modellbildung zum Gelingen des Zentrums bei.

Messung von niederfrequenten Hirnfunktionen mit der DC-Magnetometrie



“Berlin Neuroimaging Centre“

In a two-step selection procedure with international assessment, the Federal Ministry of Education and Research (BMBF) has established five imaging centres in the field of clinical neuroscience. One of these centres is the *Berlin Neuroimaging Centre* (BNIC). The application for setting it up was filed under the overall control of the *Humboldt Universität Berlin* together with the *Freie Universität Berlin* and Division 8 “*Medical Physics and Metrological Information Technology*” of the PTB. The objective of these centres is to allow brain functions to be more precisely localized by enhanced imaging of the central nervous system and by integration of various imaging methods, and to identify the causes of neurological deficits in diseases with a view to contributing to enhanced diagnostics and to a more specific therapy and rehabilitation of neurological diseases. The main work of the BNIC, which took up operation in June 2002, is focused on the improvement of stroke diagnostics and on better understanding neurovascular coupling. The PTB has a part in this centre with two infrastructure projects, “*MR Physics/MR Measuring Techniques*” and “*Biomagnetism/Magnetoencephalography* (MEG).” The objective of the research and development work carried out jointly with other members of the centre within the scope of these infrastructural projects is, among other things, the integration of functional (3 tesla) NMR tomography and magnetoencephalography with near-infrared spectroscopy (NIRS). The PTB makes available to the other members of the centre its metrological infrastructure for medical measuring techniques, and with its experience in the fields of measurement data acquisition, signal processing, data analysis and

modelling contributes to the success of the centre.

Measurement of low-frequency brain functions by DC magnetometry

Technische Zusammenarbeit mit Mittel- und Südamerika

Eine internationale Konferenz über Akkreditierung in Berlin im September 2002, die von der ILAC (*International Laboratory Accreditation Cooperation*) gemeinsam mit dem IAF (*International Accreditation Forum*) veranstaltet wurde, war der Ausgangspunkt für ergänzende Veranstaltungen, die gemeinsam mit dem NIST (*National Institute of Standards and Technology, USA*) für Teilnehmer aus Entwicklungs- und Transformationsländern durchgeführt wurden. Für mehr als 40 Teilnehmer, vorwiegend aus Mittel- und Südamerika und der Gemeinschaft unabhängiger Staaten (GUS), wurden vertiefende Seminare und Fortbildungsprogramme rund um das Thema Akkreditierung geboten. Als Mitwirkende konnten international anerkannte Fachleute, die auch an der Konferenz teilnahmen, gewonnen werden. Die praktische Umsetzung internationaler Normen zum Thema Qualitätsmanagement wurde während eines Firmenbesuches demonstriert. Zum Programm gehörte auch ein Besuch der PTB in Braunschweig mit Informationen über die PTB, den *Deutschen Kalibrierdienst* und einem Blick in ausgewählte Laboratorien. Die Teilnehmer nutzten intensiv die Möglichkeiten, ihre Probleme mit Fachleuten zu diskutieren und Erfahrungen untereinander auszutauschen. Sie äußerten die Überzeugung, die vielfältigen Hinweise und Empfehlungen in die Praxis umsetzen zu können. Vertreter von NIST und PTB stimmten überein, die Zusammenarbeit in Zukunft fortzusetzen.

Zum Schluss der Veranstaltungen verabschiedete sich der langjährige Leiter des Referats Technische Zusammenarbeit in Mittel- und Südamerika, Dr. Reiner Schroerschwartz, von seinen Projektpartnern und Kollegen und führte seinen Nachfolger, Dieter Schwohnke, ein.

Technical cooperation with Central and South America

An international conference on accreditation organized by the ILAC (*International Laboratory Accreditation Cooperation*) together with the IAF (*International Accreditation Forum*) in Berlin in September 2002 was the starting point for supplementary events for participants from developing and transition countries, carried out jointly with the NIST (*National Institute of Standards and Technology, USA*). For more than 40 participants, mainly from Central and South America and from the Community of Independent States (CIS), intensifying seminars and advanced training programs on accreditation were offered. Internationally renowned experts who were also taking part in the conference could be won as lecturers. During a company visit it was demonstrated how international standards on quality management are translated into practice. The program also included a visit to the PTB in Braunschweig, where the participants were provided with information on the PTB and the *Deutscher Kalibrierdienst* (*German Calibration Service*) and could take a look at selected laboratories. The participants eagerly seized the opportunity to discuss their problems with experts and to exchange experience. They expressed their conviction that they would be able to make practical use of the various hints and recommendations. Representatives of the NIST and the PTB agreed that the cooperation should be continued.

At the end of the meeting, Dr. Reiner Schroerschwartz, the Head of the Section Technical Cooperation in Central and South America of many years' standing, bade farewell to his project partners and colleagues and introduced his successor, Dieter Schwohnke.

Offen für Besucher

An insgesamt drei Tagen öffnet die PTB in Braunschweig und Berlin ihre Türen, um einer interessierten Öffentlichkeit zu zeigen, was sich hinter dem Begriff „Metrologie“ verbirgt. Insgesamt 6000 Besucher fanden dabei den Weg in die Laboratorien der PTB.

Den Anfang machte am 15. Juni das Berliner Institut. Zum zweiten Mal beteiligte sich die PTB an der „Langen Nacht der Wissenschaften“, in der über 70 Einrichtungen in und um Berlin ihre Arbeiten und Ergebnisse vor allem für Nicht-Fachleute vorstellten. Die PTB präsentierte sich dabei sowohl auf dem Traditionsstandort in Charlottenburg als auch mit dem Synchrotronstrahlungslabor bei BESSY II. So konnten sich die Besucher im Hermann-von-Helmholtz-Bau auf einen Rundgang mit 16 Stationen begeben und dabei die Spannweite der PTB von biomedizinischen Magnetfeldmessungen des Herzens und des Gehirns bis hin zu Softwareprüfungen von Spielgeräten kennenlernen.

Gleich an zwei Tagen gestattete die PTB in Braunschweig einen Blick hinter die Kulissen. Am so genannten Schülertag (6. September) waren rund 100 Schülergruppen auf dem Gelände unterwegs, wobei jeder dieser Gruppen im Vorfeld ein individuelles Besuchsprogramm zusammengestellt worden war. Der darauf folgende Tag (7. September) war dagegen als allgemeiner Tag der offenen Tür konzipiert. Insgesamt 27 Laboratorien standen den Besuchern offen. Ergänzt wurde der Tag durch PTB-spezifische Ausbildungs- und Berufsinformationen, durch eine kleine Phänomena-Ausstellung mit „Physik zum Anfassen“ und durch ein Internet-Café.

Open to visitors

On three days on the whole, the PTB opened its doors in Braunschweig and Berlin to show an interested public what “metrology” is about, and about 6000 visitors found their way into the laboratories of the PTB.

The beginning was made on June 15 by the Berlin Institute. For the second time already, the PTB took part in the “Long Night of Sciences” in which more than 70 institutes in and around Berlin presented their work and achievements especially to the lay public. The PTB presented itself not only at its traditional site in Charlottenburg but also at its Synchrotron Radiation Laboratory at BESSY II. At the Hermann von Helmholtz Building, visitors could go on a tour of 16 stations and get an insight into the PTB's broad field of activities, from biomedical magnetic field measurements on heart and brain to the testing of software for gaming machines.

A look behind the scenes was possible at the PTB in Braunschweig even on two days. On the so-called Pupils' Day (September 6), about 100 groups of pupils were roaming the PTB site. For each of the groups, an individual sightseeing program had been tailored beforehand. The following day (September 7) was Visiting Day for the general public. 27 laboratories had been opened for visitors. The program was supplemented by information stalls on PTB-specific vocational training possibilities, a small hands-on exhibition of physical phenomena and an Internet café.

Tag der offenen Tür
 Samstag, 7.9.2002
 9 Uhr bis 18 Uhr

Schüler- und Studententag
 (nur für angemeldete Gruppen)
 Freitag, 6.9.2002
 8 Uhr bis 17 Uhr

Physikalisch-Technische Bundesanstalt
 Braunschweig, Bundesallee 100
 Buslinie 461 (PTB)
 auf dem Gelände
 Telefon: 05 31/592-30 06
 E-Mail: presse@ptb.de

Monographie: Herausforderung Metrologie

Die Geschichte der PTB ist nun auch aufgeschriebene Geschichte. Prof. Dieter Kind, Präsident der PTB von 1975 bis 1995, beschreibt mit seinem Buch „Herausforderung Metrologie“, wie und unter welchen politisch-wirtschaftlichen Bedingungen sich die PTB seit 1945 entwickelt hat – dies aus der Perspektive des Wissenschaftlers, der den Ausbau der PTB in verantwortlicher Stellung zugleich aktiv beeinflusst hat.

Die „Herausforderung Metrologie“ ist dabei nicht das erste Buch, welches die Geschichte in den Blick nimmt: Die 1987 erschienene Festschrift zum 100-jährigen Jubiläum der *Physikalisch-Technischen Reichsanstalt/Bundesanstalt* (PTR/PTB) war der erste Band einer Monographienreihe über Themen, die in der Bundesanstalt bearbeitet wurden oder in einem engen Kontext zu ihr stehen. Zu dieser Monographienreihe zählen auch die Arbeiten von David Cahan, „Meister der Messung“, über die PTR im Deutschen Kaiserreich, und von Ulrich Kern, „Forschung und Präzisionsmessung“, über die PTR zwischen 1918 und 1948. Das vorliegende Buch, das die Entstehung der PTB nach dem Zusammenbruch am Ende des Zweiten Weltkriegs und die Entwicklung bis heute beschreibt, komplettiert damit die Reihe zu einer geschlossenen Darstellung der Geschichte der Metrologie in Deutschland von den Anfängen im 19. bis zum Beginn des 21. Jahrhunderts.

Nach einer Veranstaltung in Braunschweig, etwa 1949
Vorn: R. W. Pohl (mit Tasche) und W. Kösters, der erste Nachkriegspräsident, 2. v. r.: M. Grützmaker

After a meeting in Braunschweig, about 1949
in front: R. W. Pohl (with bag) and W. Kösters, the first post-war President, 2nd from right: M. Grützmaker

Monograph: Metrology as a challenge

The history of the PTB has now also been laid down in writing. In his book “Metrology as a Challenge,” Prof. Dieter Kind, President of the PTB from 1975 to 1995, describes the development of the PTB since 1945 and the political and economic setting – all this from the viewpoint of the scientist who, due to his leading position, also influenced the development of the PTB actively.

This book is not the first publication on the history of the PTB: The commemorative publication of 1987 on the occasion of the 100th anniversary of the *Physikalisch-Technische Reichsanstalt/Bundesanstalt* (PTR/PTB) was the first of a series of monographs on subjects dealt with by the PTB or connected with it. This series of monographs also includes the works by David Cahan, “Master of Measurement,” on the PTR in the German Empire, and by Ulrich Kern, “Research and Precision Measurement,” on the PTR between 1918 and 1948. Kind's book, which describes the emergence of the PTB after the collapse at the end of World War II and its development until today, thus completes the series so that a complete description of the history of metrology in Germany is finally available, starting from its beginnings in the 19th century up to the early days of the 21st century.



Promotionen 2002 • doctorates in 2002

| | |
|----------------------------|--|
| Arz, Uwe (2.22) | Breitbandige On-Wafer-Messverfahren zur Bestimmung des elektrodynamischen Verhaltens planarer Leitungssysteme in der Mikroelektronik |
| Breitzke, Hergen (8.21) | Untersuchungen der Temperaturabhängigkeit der Cu-NQR-Spektren von Hoch-Tc-Supraleitern des HgBaCaCuO-Systems |
| Ebbecke, Jens (2.41) | Untersuchungen zum Einzelelektronentransport mit akustischen Oberflächenwellen |
| Frase, Carl Georg (5.22) | Untersuchungen zur Signalentstehung mittels Sekundärelektronen an Mikrostrukturkanten in einem Niederspannungs-Rasterelektronenmikroskop |
| Glinka, Michael (1.43) | Modellierung und experimentelle Untersuchung thermoakustischer Ultraschall-Leistungsmesser |
| Gottwaldt, Lars (2.41) | Korrelation der optischen und der Magnetotransporteigenschaften von AlGaAs/GaAs-Heterostrukturen |
| Greif, Klaus-Dieter (6.41) | Mikro-Ionenstrahl-Apparatur zur Exposition lebender Zellen |
| Grübling, Peter (7.11) | Untersuchung der Strahlungscharakteristik eines resonant mikrowellengeheizten Plasmas im Vakuum-UV |
| Hoeschen, Christoph (4.22) | Das reale Strahlenbild bei einer Röntgenthoraxaufnahme |
| Kobusch, Michael (1.1) | Zur dynamischen Kraftmessung mit monolithischen Laserkristallen |
| Markus, Detlef (3.41) | Berechnung von Explosionsgrenzen und Zündprozessen für sicherheitstechnische Fragestellungen |
| Nordahn, Morten (8.21) | Methods for modelling compound action currents in peripheral nerves |
| Samwer, Ben (2.4) | Direkt-Lithographische Herstellung und Charakterisierung von metallischen Nano-Strukturen |
| Thedens, Martin (3.41) | Funkenzündung von Gasgemischen bei erhöhten Drücken und Temperaturen für die Zündschutzart Eigensicherheit |
| Wilpers, Guido (4.31) | Ein optisches Frequenznormal mit kalten und ultrakalten Atomen |
| Wittstock, Volker (1.42) | Experimentelle Bestimmung der Schallleistung quer angeströmter Kreiszyylinder in einem weiten Bereich von Ähnlichkeitskennzahlen |

Zahlen und

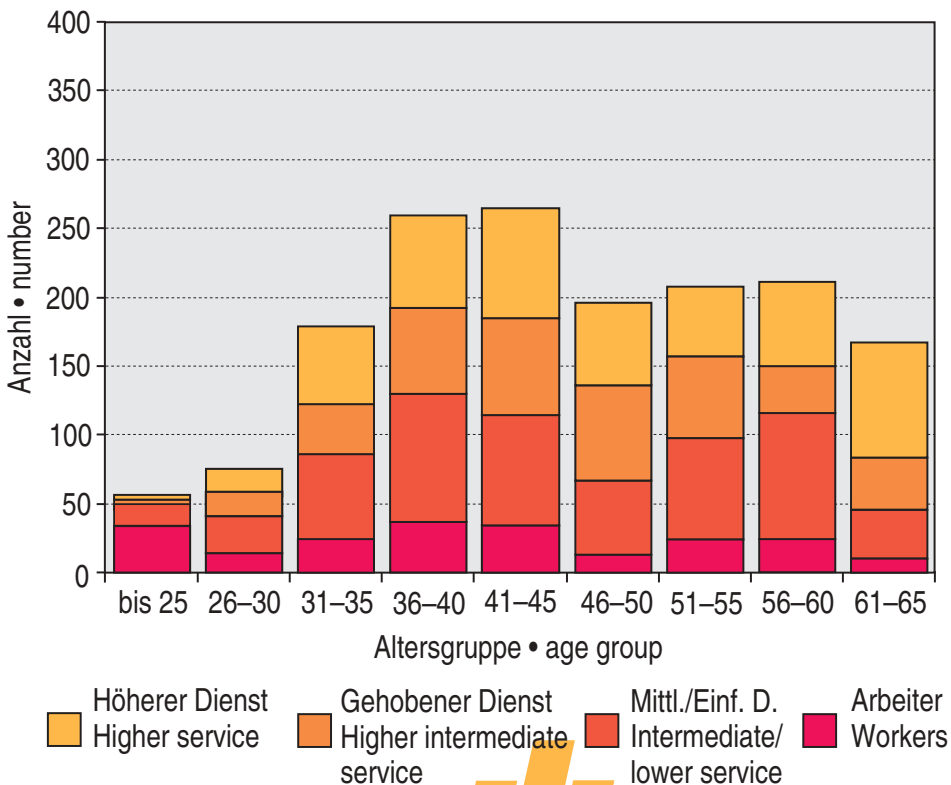
Personal: Entwicklung • Staff: development

Personelle Entwicklung von 1993 bis 2002 (Stand: 31. Dezember 2002) • Development of staff

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

| Beschäftigungsverhältnis | 1993 | 1994 | 1995 | 1996 | 1997 | 1998 | 1999 | 2000 | 2001 | 2002 |
|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| a) | | | | | | | | | | |
| Beamte • civil servants | 496 | 502 | 500 | 483 | 483 | 486 | 490 | 501 | 503 | 507 |
| Angestellte • employees | 903 | 877 | 868 | 869 | 850 | 827 | 821 | 808 | 786 | 767 |
| Arbeiter • workers | 264 | 259 | 246 | 242 | 234 | 227 | 223 | 201 | 204 | 201 |
| Kasinerpersonal • canteen staff | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 6 | 6 | 7 | 7 |
| gesamt • total | 1671 | 1646 | 1622 | 1602 | 1575 | 1548 | 1540 | 1516 | 1500 | 1482 |
| b) | | | | | | | | | | |
| Auszubildende • trainees | 119 | 124 | 123 | 133 | 142 | 150 | 151 | 147 | 136 | 138 |
| Aushilfskräfte temporary staff | 38 | 44 | 22 | 16 | 19 | 35 | 32 | 44 | 52 | 53 |
| Drittmittelpersonal staff members financed by third parties | 79 | 92 | 93 | 104 | 85 | 110 | 70 | 92 | 104 | 106 |
| Mitarbeiter gesamt staff member total | 1907 | 1906 | 1860 | 1855 | 1821 | 1843 | 1793 | 1799 | 1792 | 1779 |

Personal: Altersstruktur • Staff: age structure



Fakten

Ausbildung • Training (14. Oktober 2002)

| | BS | Berlin | |
|--|----------|--------|---|
| Kommunikationselektroniker | 22 (10) | 9 (2) | communication electronics technologists |
| IT-Systemelektroniker | 16 (6) | – – | information and telecommunication technologists |
| Physiklaboranten | 18 (5) | – – | laboratory technicians, physics |
| Mikrotechnologen | 1 (0) | – – | microtechnologists |
| Elektroinstallateure | 14 (3) | – – | electrical fitters |
| Feinmechaniker | 8 (2) | 9 (2) | precision mechanics |
| Maschinenbaumechaniker | 13 (4) | – – | machine construction mechanics |
| Fotografen | 5 (1) | – – | photographers |
| Technische Zeichner | 5 (1) | – – | draftsmen |
| Köche | 6 (2) | – – | cooks |
| Tischler | – – | 2 (0) | joiners |
| Fachangestellte für Bürokommunikation | – – | 10 (3) | specialists in office communications |
| gesamt | 108 (34) | 30 (7) | total |

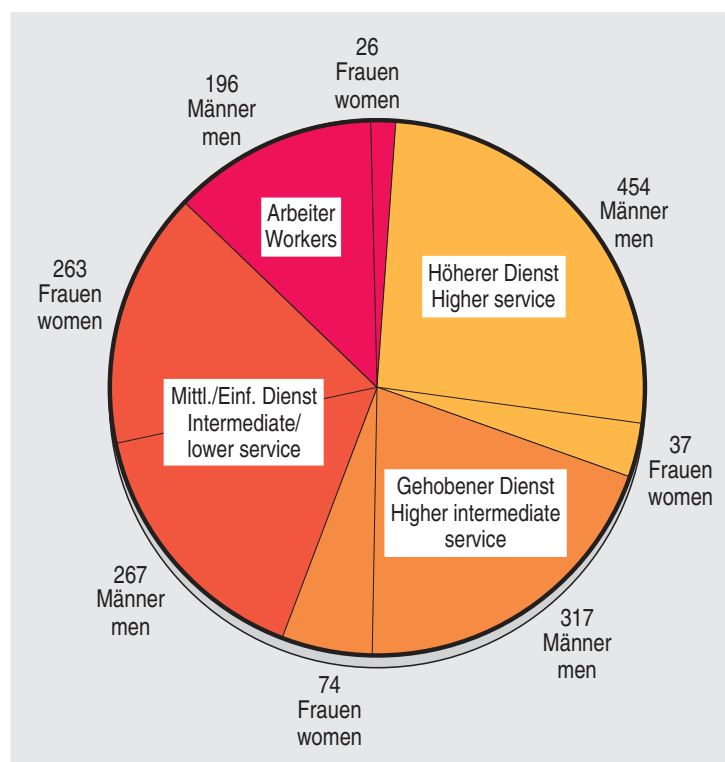
Die PTB gehört zu den größten Ausbildungsbetrieben in der Region. Gegenwärtig sind 108 Auszubildende bei der PTB angestellt (Stand: 14. Oktober 2002). Die Übersicht zeigt die Verteilung auf die einzelnen Ausbildungsberufe. In Klammern sind die Neueinstellungen im Berichtsjahr angegeben.

The PTB is among the most important institutions of the region which provide training. 108 trainees are at present employed by PTB (as of October 14, 2002). The survey shows the assignment to the individual trainee occupations. 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)



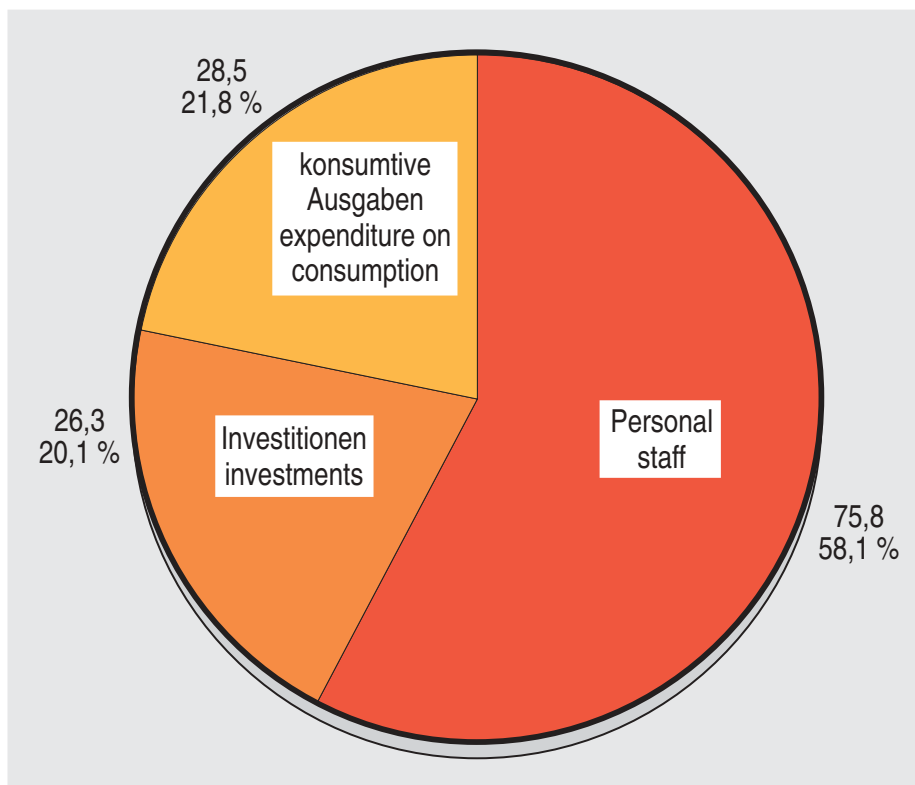
Haushalt: Gebühren • Budget: charges

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 | 2000 | 2001 | 2002 | charges |
|---|------|------|------|--|
| Amtshandlungen und sonstige Gebühren | 5755 | 5874 | 5812 | official acts and repayment work; other fees |
| Prüfung und Zulassung von Spielgeräten von Prüfstellen (Elektrizität) | 1532 | 1523 | 1615 | tests and approvals of gaming machines of test centres (electricity) |
| Leistungen im Rahmen des DKD | 269 | 334 | 245 | services rendered within the framework of DKD |
| gesamt | 1018 | 1003 | 957 | |
| | 8574 | 8734 | 8629 | total |

Haushalt: Ausgabenverteilung • Budget: break-down of expenditure



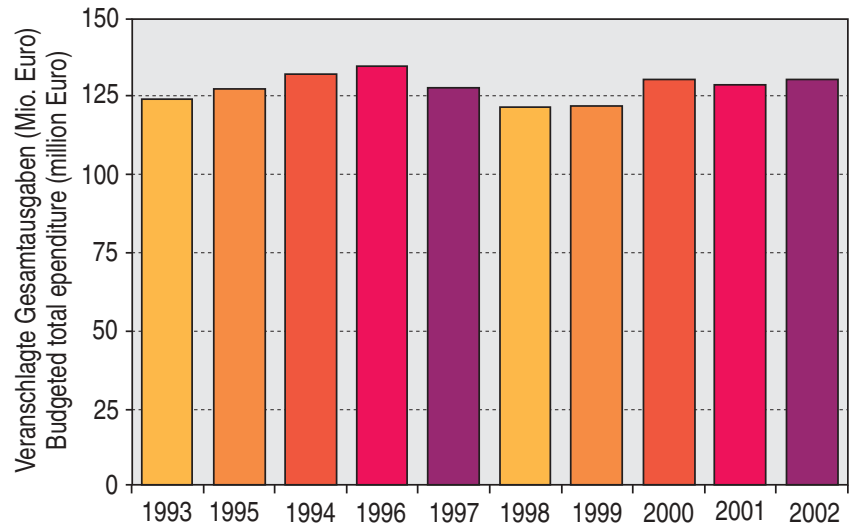
Die Grafik zeigt, wie sich im Berichtsjahr die veranschlagten Ausgaben verteilen (in Mio. Euro). Zum Vergleich nennt die Tabelle die Vergleichszahlen der letzten Jahre.

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 | 2000 | 2001 | 2002 | budgetary means |
|--------------------------------|-------|-------|-------|---|
| Personalausgaben | 74,0 | 73,7 | 75,8 | staff costs |
| Investitionen (Bau und Geräte) | 30,4 | 25,6 | 26,3 | investments (building activities and instruments) |
| konsumtive Ausgaben | 26,0 | 29,4 | 28,5 | expenditure on consumption |
| gesamt | 130,4 | 128,7 | 130,6 | total |

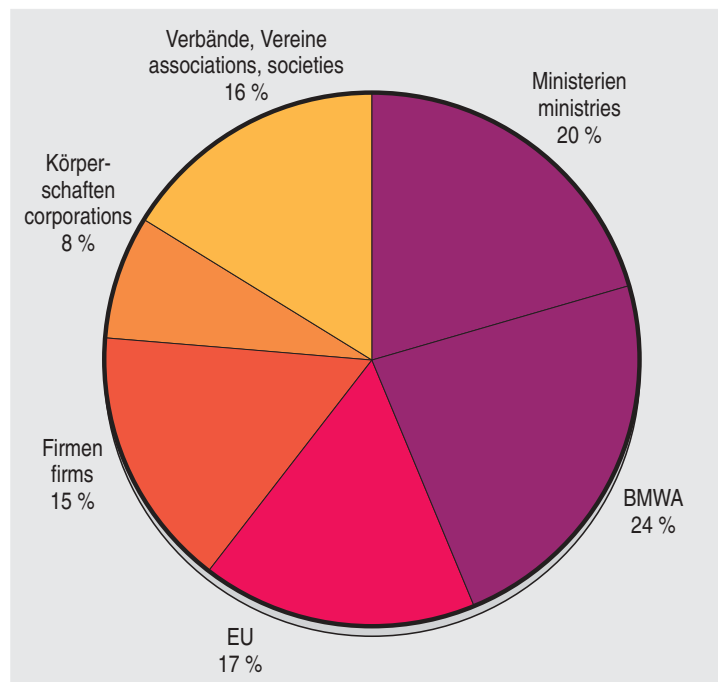
Haushalt: Entwicklung • Budget: development



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 der Forschungsvorhaben summieren sich 2002 auf 5,8 Mio. Euro. Die Grafik gibt die prozentualen Anteile der unterschiedlichen Quellen an. Insgesamt wurden im Berichtsjahr 9,6 Mio. Euro für 276 Drittmittelprojekte (Forschungsvorhaben und Projekte der Technischen Zusammenarbeit) verwendet (davon 2,2 Mio. Euro für 57 Projekte in Berlin). Hinzu kommen 23 Sachbeihilfen der Deutschen Forschungsgemeinschaft mit einem Gesamtvolumen von 762 000 EURO, davon 4 Sachbeihilfen mit 137 000 Euro in Berlin.

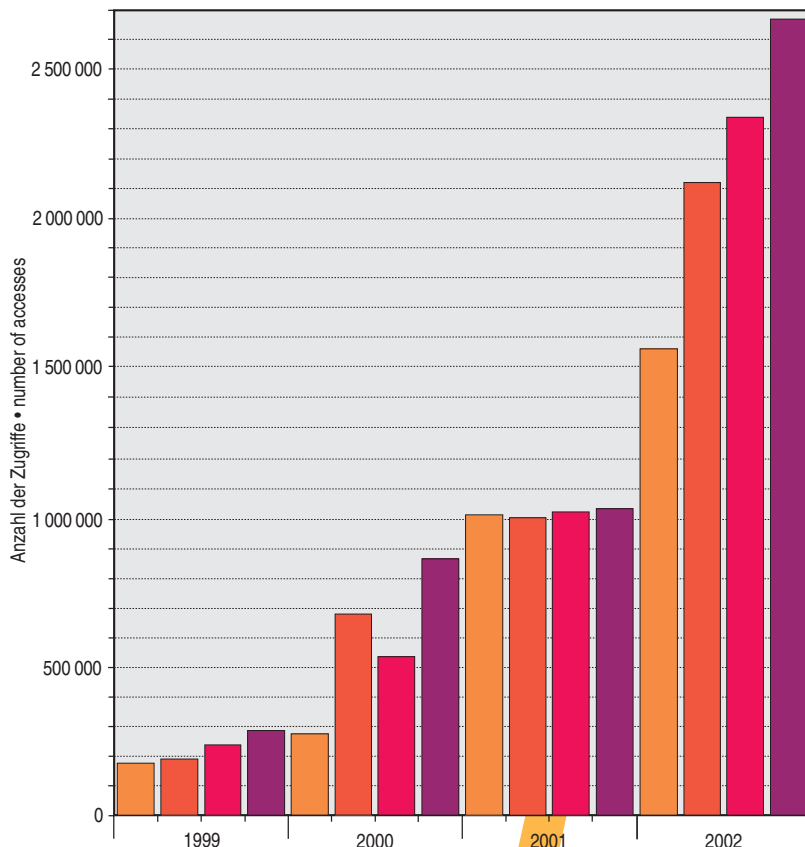


In 2002, the third party funds for research projects added up to a total of 5,8 million Euro. The chart shows the contributions (in percent) from the different sources. In the year under review, a total of 9,6 million Euro were used for 276 third-party projects (research projects and technical cooperation projects), 2,2 million Euro of these for 57 projects in Berlin. Added to this are 23 contributions in kind from the Deutsche Forschungsgemeinschaft with an overall volume of 762 000 Euro, four of these contributions with a volume of 137 000 Euro for Berlin.

Umwelt: Verbrauchszahlen • Environment: consumption figures

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

| ... in Braunschweig | | 2000 | 2001 | 2002 | |
|----------------------------|----------------|---------|---------|---------|--------------------------------|
| elektrische Energie | MWh | 23 032 | 20 821 | 21 344 | electrical energy |
| Wärme | MWh | 22 815 | 22 812 | 23 820 | heat |
| Gas | m ³ | 44 774 | 38 032 | 32 776 | gas |
| Wasser | m ³ | 105 112 | 112 210 | 82 654 | water |
| Abfälle: | | | | | waste produced: |
| hausmüllähnliche | | | | | |
| Gewerbeabfälle | t | 117 | 103 | 93 | refuse-like industrial waste |
| recycelte Abfälle | t | 250 | 241 | 255 | recycled waste |
| Sonderabfälle | t | 20 | 14 | 10 | hazardous waste |
| Entsorgungskosten (ca.) | EUR | 137 000 | 141 100 | 149 650 | waste disposal costs (approx.) |
| ... in Berlin | | 2000 | 2001 | 2002 | |
| elektrische Energie | MWh | 5249 | 4391 | 3565 | electrical energy |
| Gas | m ³ | 4243 | 5864 | 8643 | gas |
| Wasser | m ³ | 69 440 | 45 662 | 31 510 | water |
| Helium, flüssig | l | 52 600 | 57 420 | 34 850 | helium, liquid |
| Stickstoff, flüssig | l | 74 160 | 76 554 | 53 000 | nitrogen, liquid |
| Abfälle: | | | | | waste produced: |
| Reststoffe insgesamt (ca.) | t | 272 | 350 | 255 | residues, total (approx.) |
| hausmüllähnliche | | | | | |
| Gewerbeabfälle | t | 60 | 25 | 26 | refuse-like industrial waste |
| recycelte Abfälle | t | 200 | 300 | 215 | recycled waste |
| Sonderabfälle | t | 12 | 25 | 14 | hazardous waste |
| Entsorgungskosten (ca.) | EUR | 50 100 | 56 200 | 41 000 | waste disposal costs (approx.) |

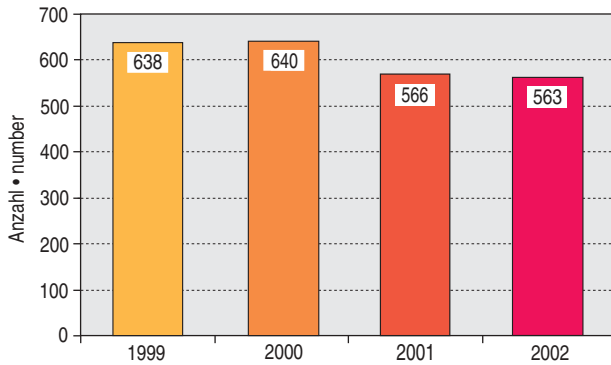


Internet

Vierteljährliche externe Zugriffszahlen auf den WWW-Server der PTB in den Jahren 1999 bis 2002

Quarterly accesses (external) to the PTB's www server between 1999 and 2002

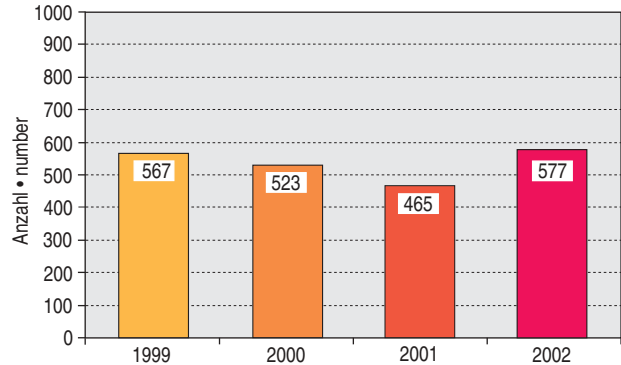
Veröffentlichungen • Publications



Anzahl der Veröffentlichungen der PTB-Mitarbeiter/innen (in wissenschaftlichen Journalen, Büchern, Tagungsbänden etc.) in den Jahren 1999 bis 2002 (vgl. Datenbank im Internet)

Number of publications by PTB staff members (in scientific journals, books, conference digests, etc.) between 1999 and 2002 (cf. database on the web)

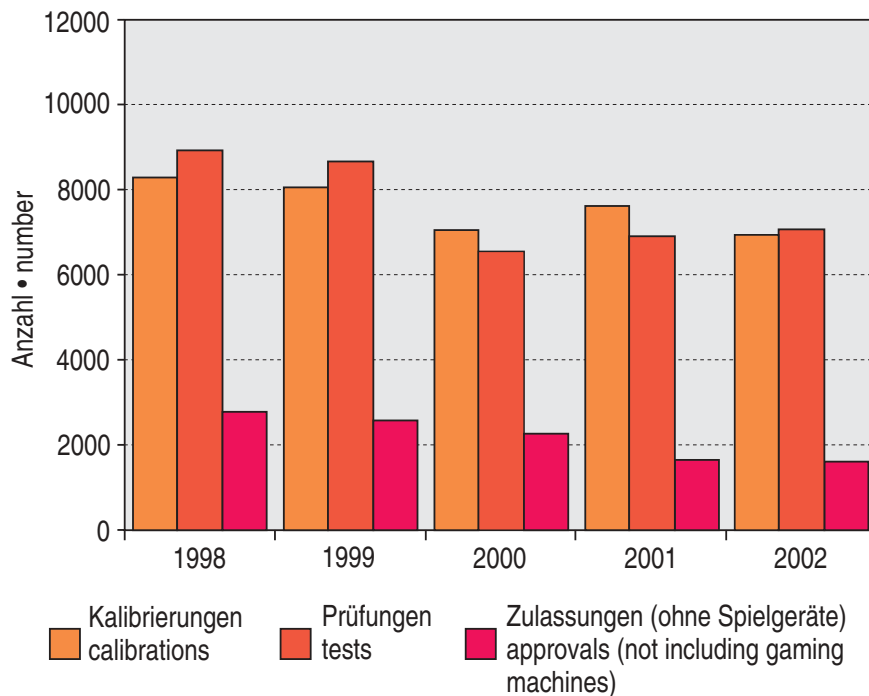
Vorträge • Lectures



Anzahl der auswärtigen Vorträge, die PTB-Mitarbeiter/innen in den Jahren 1999 bis 2002 gehalten haben

Number of lectures held by PTB staff members outside PTB between 1999 and 2002

Kalibrierungen, Prüfungen, Zulassungen • Calibrations, tests, approvals



Calibrations, tests and approvals (as measurement tasks for consumer protection purposes and as services rendered to industry) are essential duties of PTB and their scope makes up a considerable part of the PTB's work. The approvals represented in the graph do not include the area of cash gaming and funfair machines. A total of 93 482 approvals were granted in this field in 2002 (above all for permanently installed gaming machines). (A survey of all calibrations, tests and approvals, classified by PTB Divisions, can be found in the Internet, on the PTB homepage.

Kalibrierungen, Prüfungen und Zulassungen (einerseits als messtechnische Aufgaben im Verbraucherschutz, andererseits als Dienstleistungen für die Industrie) gehören wesentlich mit zur PTB; allein ihr Umfang macht einen beträchtlichen Teil der Tätigkeiten der PTB aus. Bei den Zulassungen berücksichtigt die Grafik nicht den Bereich der Geld- und Warenspielgeräte. In diesem Bereich wurden 2002 insgesamt 93 482 Zulassungen (vor allem von Geldspielgeräteaufstellungen im stehenden Gewerbe) erteilt. (Eine nach den PTB-Abteilungen geordnete Aufstellung aller Kalibrierungen, Prüfungen und Zulassungen finden Sie im Internet, auf der Homepage der PTB).

Projektpartner der PTB

PTB's project partners



Stand November 2002

Internationale Zusammenarbeit

Großen Umfang innerhalb des Arbeitsgebiets „Internationale Angelegenheiten“ nimmt die Technische Zusammenarbeit mit Entwicklungs- und Schwellenländern ein. Die PTB gibt ihre Erfahrungen weiter und leistet aktive Hilfe beim Aufbau von Systemen der Konformitätsbewertung mit den Komponenten Mess-, Normen-, Prüf- und Qualitätswesen, Akkreditierung und Zertifizierung (MNPQ) und Umweltschutz. Die Mittel werden überwiegend vom *Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung* (BMZ) zur Verfügung gestellt. Im Berichtsjahr wurden 15 Länder in vier Kontinenten durch 24 bilaterale Projekte beim Aufbau ihrer technischen Infrastruktur allein aus Mitteln des BMZ unterstützt. Weitere Länder profitieren von regionalen und sektoralen Projekten.

International affairs

In the area of international affairs, Technical Cooperation with developing and newly industrialized countries is of great importance. The PTB offers its experience and lends active support for setting up conformity testing systems covering metrology, standardization, testing and quality assurance, accreditation and certification (MSTQ) as well as environmental protection. The funds are mainly made available by the *Federal Ministry for Economic Cooperation and Development* (BMZ) and by regional and international donors such as the EU and the World Bank. In the year under report, 15 countries in four continents were assisted within the scope of 24 projects in setting up a technical infrastructure from BMZ funds alone.

Gastwissenschaftler, Gäste und Besucher

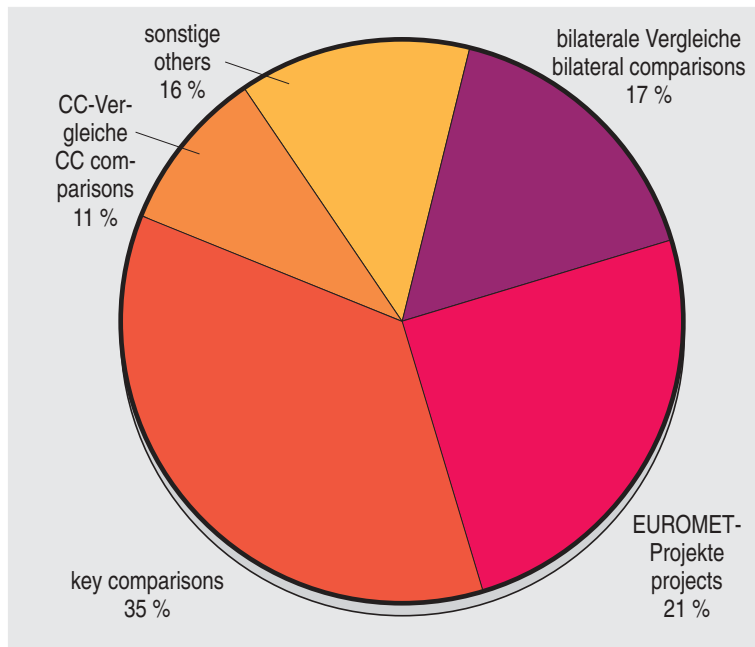
Die Welt hat ein Interesse an der Arbeit der PTB. Das zeigt sich bereits an den zahlreichen Gastwissenschaftlern, Gästen und Besuchern, die im letzten Jahr in der PTB waren.

Mehr als 500 Gäste und Gastwissenschaftler aus aller Welt kamen zu Besuchen und zu fachlichem Austausch in die PTB und um in den Laboratorien mitzuarbeiten. Den größten Anteil hatten dabei Wissenschaftler aus Russland und Osteuropa, aus China und Japan sowie aus Südamerika.

(Eine Auflistung dieser Gastwissenschaftler und Gäste finden Sie im Anhang des Web-Jahresberichts.)

Auch der allgemeine Besucherdienst der PTB, im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit, fand wie gewohnt regen Zuspruch. 1365 Besucher (in 60 Gruppen) passierten die Tore der PTB und blickten den Wissenschaftlern in deren Laboratorien über die Schultern. Die meisten Besucher waren dabei Schüler und Studenten.

Internationale Vergleichsmessungen • International comparison measurements



In the year under review, the PTB participated in 75 comparison measurements, viz. 26 key comparisons, eight CC comparisons (organized by the Consultative Committees of the International Committee for Weights and Measures, CIPM), 16 regional comparisons within EUROMET, 13 bilateral comparisons and 12 other comparisons.

Die PTB nahm im Berichtsjahr an 75 Vergleichsmessungen teil und zwar an 26 Schlüsselvergleichen (key comparisons), acht CC-Vergleichen (organisiert von den Beratenden Komitees des Internationalen Komitees für Maß und Gewicht, CIPM), 16 regionalen Vergleichen innerhalb von EUROMET, 13 bilateralen Vergleichen und zwölf sonstigen Vergleichen.

Guest scientists, guests and visitors

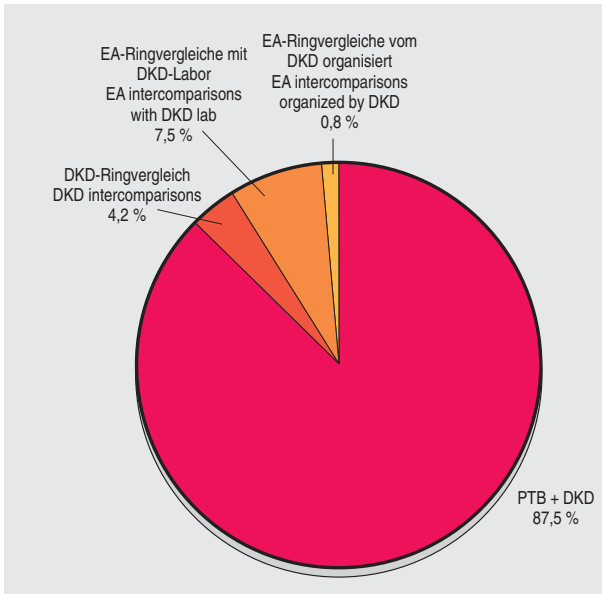
There is a worldwide interest in the PTB's work. Guest scientists, guests and visitors who came to PTB in the past year are proof of this.

More than 500 guests and guest scientists from all parts of the world came to PTB as visitors, for an exchange of views on technical questions and to cooperate in the laboratories. The largest number of scientists came from Russia, East-Europe, China, Japan and South-America.

(A list of these guest scientists and guests can be found in the appendix to the annual report on the web.)

As in previous years, the general visitor service offered within the framework of public relations work was frequently made use of. 1365 visitors (in 60 groups) went through the PTB gate and watched the scientists work in their laboratories. Most of the visitors were pupils and students.

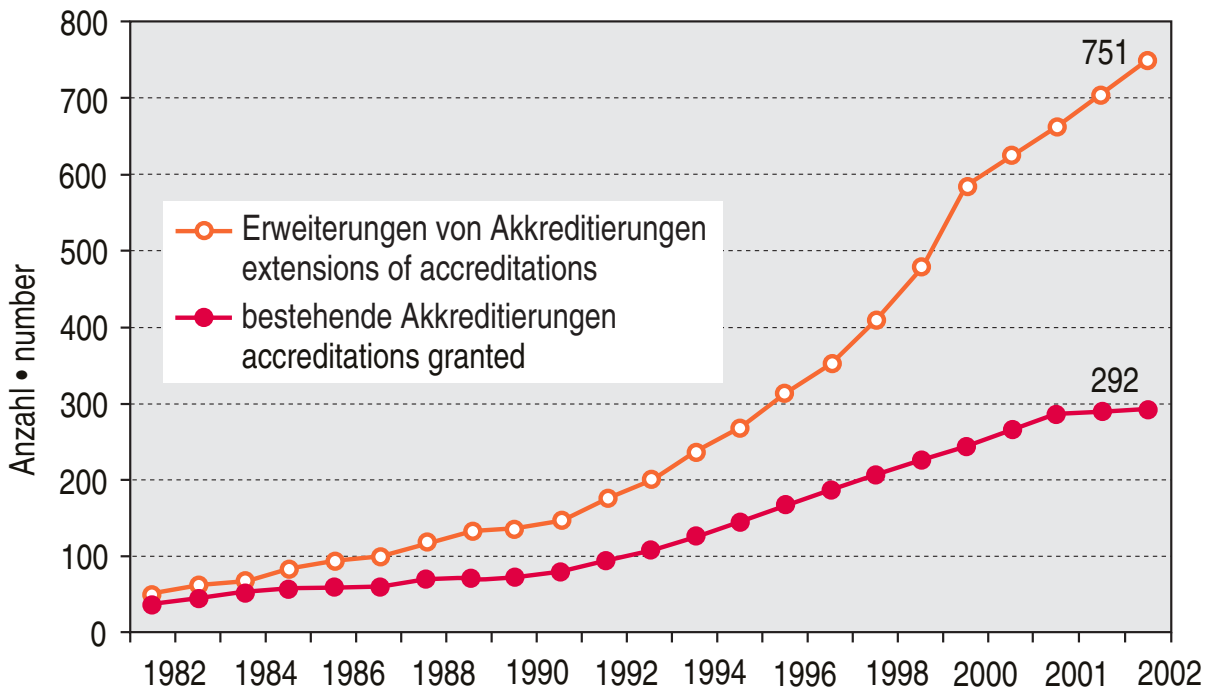
DKD-Vergleichsmessungen • DKD comparison measurements



Die im DKD akkreditierten Laboratorien (DKD-L) nahmen im Berichtsjahr an 120 Vergleichsmessungen teil. Den größten Anteil daran hatten 105 bilaterale Vergleichsmessungen zwischen der PTB und DKD-L (PTB + DKD), hinzu kommen fünf DKD-Ringvergleiche mit mehreren DKD-L und der PTB als Referenzlaboratorium sowie EA-Ringvergleiche, die entweder vom DKD organisiert sind (1) oder an denen DKD-L teilnehmen (9).

In the year under review, the accredited DKD laboratories (DKDL) participated in 120 comparison measurements, the largest portion (105) being bilateral comparison measurements between PTB and DKDL (PTB + DKD). Added to this were five DKD intercomparisons involving several DKDL, with the PTB acting as the reference laboratory, as well as EA intercomparisons, either organized by DKD (1) or involving DKDL (9).

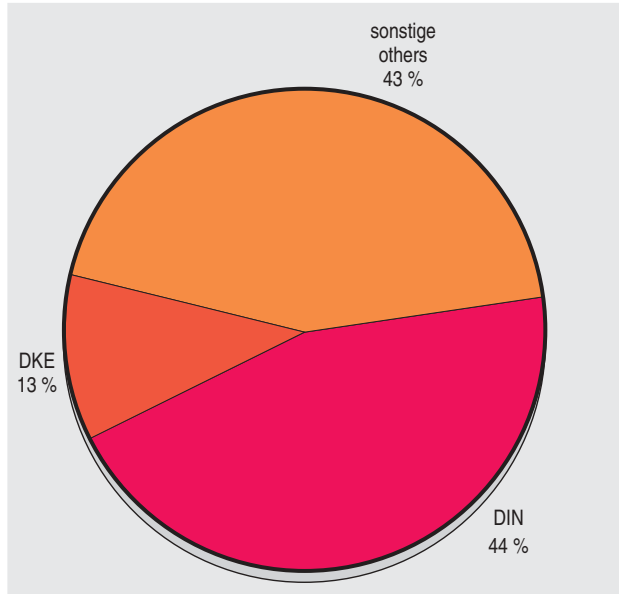
Deutscher Kalibrierdienst (DKD) • German Calibration Service (DKD)



Die Entwicklung des DKD und seine Akzeptanz bei den beteiligten Industriefirmen lässt sich nicht nur an der nach wie vor wachsenden Anzahl der akkreditierten Laboratorien ablesen, sondern auch an deren Erweiterungen. Die DKD-Laboratorien passen ihre Kalibriermöglichkeiten laufend den Erfordernissen des Marktes bzw. den gestiegenen Anforderungen an die Messgenauigkeit an. Die derzeitige Gesamtzahl akkreditierter DKD-Laboratorien resultiert aus 17 Akkreditierungen im Berichtsjahr, denen neun Rücknahmen der Akkreditierungen, z. B. durch Firmenzusammenschlüsse, gegenüberstanden.

The development of DKD and the acceptance with which it is met by the industrial firms involved cannot only be seen from the increasing number of accredited laboratories but also from the extensions of these. The DKD laboratories constantly adapt their calibration capabilities to the requirements of the market and to the ever more exacting accuracy requirements. The total number of accredited DKD laboratories as it stands today is the result of 17 accreditations granted in the year under review and nine cancellations due, for example, to the merger of firms.

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

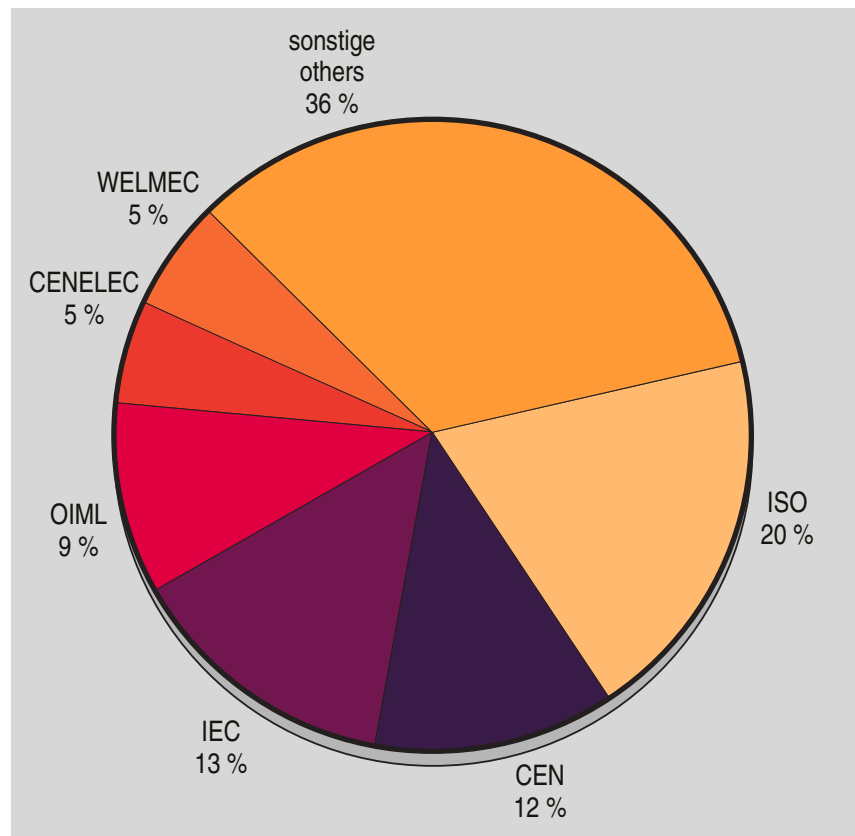


Prozentuale Verteilung der Gremienarbeit der PTB bei nationalen Normungsvorhaben. Innerhalb des *Deutschen Instituts für Normung e. V.* (DIN) war die PTB an 155 Normenvorhaben beteiligt, bei der *Deutschen Elektrotechnischen Kommission* (DKE) bei 48 Vorhaben.

Break-up of the PTB's committee work for national standardization projects (in percent). PTB cooperated in 155 projects of the *Deutsches Institut für Normung (DIN)* and in 48 projects of the *Deutsche Elektrotechnische Kommission (DKE)*.

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

Prozentuale Verteilung der Gremienarbeit der PTB bei internationalen Normungsvorhaben. Insgesamt arbeitete die PTB im letzten Jahr bei 311 solcher Normungsvorhaben mit. ISO: Internationale Organisation für Standardisierung; CEN: Europäisches Komitee für Normung; IEC: Internationale Elektrotechnische Kommission; OIML: Internationale Organisation für das gesetzliche Messwesen; CENELEC: Europäisches Komitee für elektrotechnische Normung; WELMEC: European Cooperation in Legal Metrology.



Break-up of the PTB's committee work for international standardization projects (in percent). In the past year, the PTB cooperated in 311 standardization projects of this kind. ISO: International Organization for Standardization; CEN: European Committee for Standardization; IEC: International Electrotechnical Commission; OIML: International Organization of Legal Metrology; CENELEC: European Committee for Electrotechnical Standardization; WELMEC: European Cooperation in Legal Metrology.

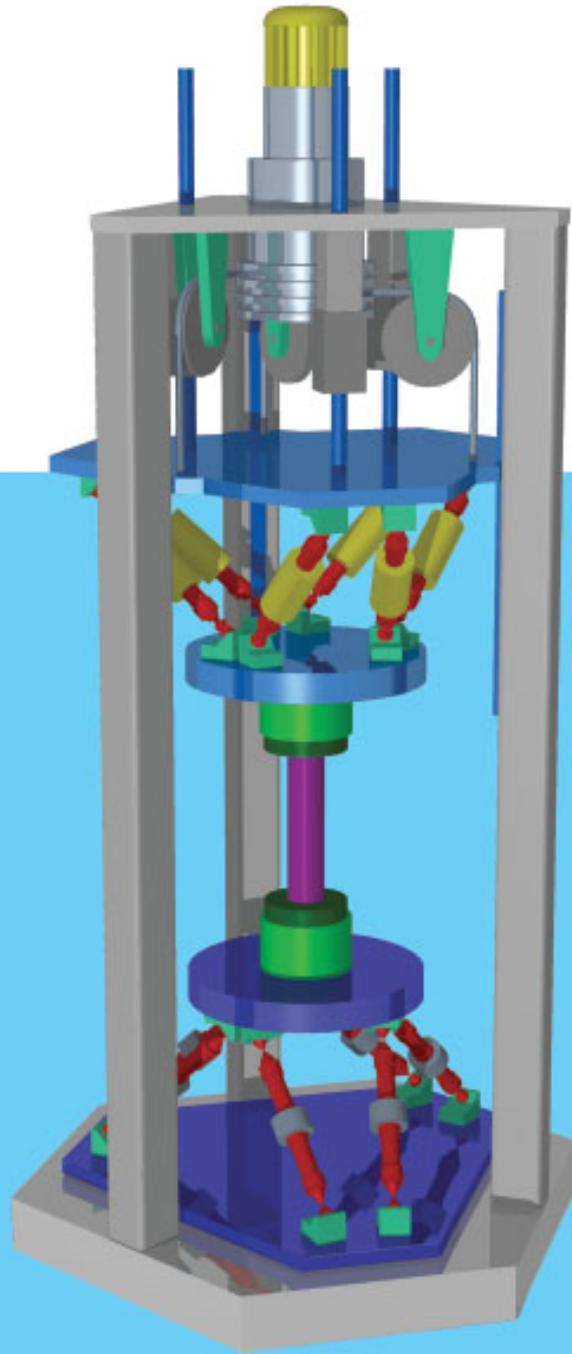
PTB

Die Abteilungen

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

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

**Mechanik
und
Akustik**



Berichte der Abteilungen

Abteilung



Mechanik u

Die Abteilung 1 besteht aus den vier Fachbereichen *Festkörpermechanik*, *Kinematik*, *Fluidmechanik* und *Akustik*. Neben der SI-Basiseinheit der Masse werden abgeleitete Einheiten für Kraft, Drehmoment, Beschleunigung, Durchfluss, Schalldruck und Schalleistung realisiert und zugehörige Grundlagenforschung durchgeführt. Eine wichtige Aufgabe ist die Weitergabe dieser Einheiten an Kalibrierlaboratorien (DKD), Eichbehörden, Industrie und Anwender aus den Bereichen Umweltschutz und Medizin. Weitere Dienstleistungen sind Geräteprüfungen im Rahmen des industriellen und gesetzlichen Messwesens sowie Beratung in allen Fragen der einschlägigen Messtechnik. Im Rahmen des MRA (Mutual Recognition Agreement) des CIPM (Comité International des Poids et Mesures) wurde 2001 in verschiedenen Bereichen mit CIPM-Schlüsselvergleichen (Key Comparisons) begonnen. Nachfolgend werden erste Ergebnisse sowie bedeutende Forschungsarbeiten und Entwicklungen aus der Abteilung vorgestellt.

Festkörpermechanik

Im Fachlaboratorium *Masse* wird mit dem Experiment Ionenakkumulation untersucht, ob das Kilogramm mit hinreichender Genauigkeit an die atomare Masseneinheit angebunden werden kann. Dazu sollen Ionen mit nur einem natürlichen Isotop, wie beispielsweise Gold oder Wismut, zu einer wägbaren Masse akkumuliert werden. Mit Hilfe von massenspektroskopischen Untersuchungen ist die Zusammensetzung des Ionenstrahles untersucht worden. Es ist gelungen, einen Goldionenstrahl mit einer Stromstärke von 0,8 mA zu erzeugen. Zur Bestimmung der bei dem

Experiment auftretenden kleinen Masseunterschiede im Bereich von wenigen Nanogramm eignet sich die Verschiebung der Eigenresonanzfrequenz eines Schwingquarzes beim Aufbringen eines metallischen Fremddadsorbats. Die Abhängigkeit der Resonanzfrequenz von der Temperatur ist untersucht worden. Für den verwendeten Schwingquarz ist im Temperaturbereich von 296 K bis 303 K die Resonanzfrequenz nahezu temperaturkompensiert. Bei höheren Temperaturen steigt die Frequenzverschiebung dagegen erheblich an und beträgt bei 312 K bereits 6,4 ppm bzw. 3,7 ng bezogen auf 298 K.

Für den Bereich der dynamischen Kraftmessung wurde mit dem Aufbau einer neuen Kraftstoß-Kalibriereinrichtung begonnen, in der erstmals Kraftstöße rückführbar gemessen werden sollen. Die in der PTB entwickelte und vom *Wissenschaftlichen Gerätebau* gefertigte Einrichtung (Bild 1) ist gekennzeichnet durch zwei luftlagergeführte Massen von etwa je 10 kg, die zusammen mit einem zu untersuchenden Referenzempfänger zum Stoß gebracht werden. Die dabei auftretenden Inertialkräfte werden mit Hilfe von Laser-Doppler-Interferometern gemessen. Durch Voruntersuchungen an einem modifizierten Pendelschlagwerk wurde die Funktionalität des Messverfahrens bestätigt.

Im Rahmen der Modernisierung der 2-MN-Kraft-Normalmesseinrichtung wurden die Arbeiten an den elektrischen und hydraulischen Einrichtungen sowie an speziellen mechanischen Baugruppen (Zentrierung, Überlastschutz) der Anlage erfolgreich zu Ende geführt. In dieser Messeinrichtung sind Kräfte im Bereich von 10 kN bis 2 MN in einer Vielzahl von Stufen realisierbar, wobei die Anstiegszeit für die Kraftaufbringung unabhängig von der gewählten Kraftstufe bei ca. 30 Sekunden liegt und damit eine Zykluszeit von etwa einer Minute erreichbar ist.

Titelbild

Prinzipbild einer Mehrkomponenten-Kalibriereinrichtung mit Hexapodenstrukturen für die Erzeugung (oben) und Messung (unten) räumlich beliebig gerichteter Kräfte und Momente

nd Akustik

Das Fachlaboratorium *Kraft* übernimmt bei den internationalen Vergleichsmessungen als Pilotlabor den Kraftbereich für 1 MN bei den CIPM Key Comparisons und zusätzlich bei den anschließenden EUROMET Key Comparisons den Kraftbereich für 4 MN. Die Messverfahren und die Vorgehensweise bei der Durchführung von internationalen Vergleichsmessungen wurden von der PTB vorgeschlagen und in der CCM Force Working Group festgelegt. Zurzeit werden in der PTB die geeigneten Krafttransfornormale systematisch untersucht und für die Vergleiche ausgewählt.

Das Projekt einer Mehrkomponenten-Referenzmesseinrichtung zur Darstellung und Messung von räumlich beliebig gerichteten Kräften (bis 10 kN) und Momenten (bis 1 kN · m) hat Gestalt angenommen. Die Ausführung sowohl des Mess- als auch des Antriebssystems als Hexapode gestattete hierbei eine kompakte und übersichtliche Konstruktion. Die Bestimmung der Geometrie der Baugruppen und die Entwicklung der Steuer-Hard- und -Software stehen vor dem Abschluss, so dass die messtechnische Erprobung und Untersuchung beginnen kann (s. auch Titelbild).

Unter maßgeblicher Beteiligung des Fachlaboratoriums *Waagen* wurden auf WELMEC-Ebene wesentliche Anforderungen für das Laden von Software in Waagen („Software-Download“) erarbeitet und verabschiedet. Damit ist es möglich geworden, Softwareteile kontrollierbar auszutauschen, ohne konventionelle eichtechnische Sicherungen zu verletzen. Ferner hat sich das Laboratorium intensiv mit der „digitalen Signatur“ für vernetzte Wägesysteme befasst, mit dem Ziel, die sichere Datenübertragung und -abfrage via Internet zu ermöglichen.

Intensive Verhandlungen zur gegenseitigen Anerkennung von Prüfergebnissen auf dem Gebiet der Wägetechnik finden zurzeit mit

den metrologischen Instituten von Russland, National-China (Taiwan) und Australien statt. Ziel der Verhandlungen ist der Abschluss bilateraler Abkommen zur wesentlich vereinfachten Zertifizierung nichtselbsttätiger Waagen, woraus sich deutliche Vorteile für die stark exportorientierte deutsche Waagenindustrie ergeben würden. Allerdings sind wegen unterschiedlicher metrologischer Niveaus bzw. Anforderungen kurzfristig noch keine Vertragsabschlüsse zu erwarten.

Kinematik

Die Neufassung und Neuordnung der gesetzlichen Bestimmungen im Bereich des Zivilen Beschusswesens durch ein eigenständiges Waffengesetz und ein separates Beschussgesetz hat in der Öffentlichkeit erhebliches Aufsehen erregt. Nicht zuletzt haben aktuelle Vorkommnisse zeitgleich zu den parlamentarischen Beratungen zu Verschärfungen der gesetzlichen Regelungen geführt. Die PTB ist insofern betroffen, als erheblich erweiterte Verpflichtungen bezüglich der Zulassung von zivilen Waffen, Schussapparaten und Zubehör erlassen worden sind, aber auch regelmäßige Bauartkontrollen nach der Zulassung nunmehr den Aufgabenbereich erweitern. Hinzu kommen neue Vorschriften über nun erforderliche zentrale Datenbankerfassungen vielfältiger Zulassungs-, Änderungs-, Handels- und Weitergabevorgänge von Waffen und Munition.

Im Bereich der amtlichen Überwachung des Straßenverkehrs sind Bremsverzögerungsmessgeräte für Bremsprüfungen an Kraftfahrzeugen eichpflichtig. Erstmals ist einer Bauart die Zulassung zur Eichung erteilt worden, bei der der Maximalwert aus dem abgespeicherten zeitlichen Verlauf des gesamten Bremsvorgangs ermittelt und der Nickwinkelverlauf des Fahrzeugs automatisch berücksichtigt wird. Diese Verfahrensweise wird modernen Bremsregelsystemen der Kraftfahrzeuge gerecht und trägt der aktuellen Diskussion zu

künftigen EU-Vorschriften über Bremsprüfungen Rechnung. Es war ein neues Prüfkonzept für Bremsverzögerungsmessgeräte zu entwickeln, bei dem auf der Basis einer Fourierzerlegung des Bremsverlaufs die dynamischen Eigenschaften des Messgeräts sachgerecht beurteilt werden.

Bei Taxametern setzt sich zunehmend die Einbeziehung der in modernen Kraftfahrzeugen über den sogenannten CAN-Bus verfügbaren Weg- und Geschwindigkeitsinformationen des Fahrzeuges durch. Dies bringt insbesondere erhebliche Änderung im Prüfkonzept der Zulassung und Eichung mit sich, die verstärkt eine enge Zusammenarbeit der PTB mit den Geräteentwicklern im Vorfeld der Zulassungsprüfungen erforderlich machen.

Messanlagen zur Geschwindigkeits-, Fahrzeugabstands- und Rotlichtüberwachung gewinnen erheblich an Komplexität, insbesondere aufgrund der angestrebten hohen Flexibilität des Einsatzes und entsprechender modularer Bauweisen. Die eichamtliche Überwachung wird hierdurch zunehmend erschwert. Ein erheblichen Anteil der durchzuführenden Prüfungen liegt sowohl bei der Zulassung als auch bei der Eichung im Bereich der Software, mit der bei modernen Geräten beispielsweise auch vollständige Sensorsignalverläufe bei Fahrzeugvorbeifahrten digital erfasst und bewertet werden. Eine umfassende Aufarbeitung aktueller diesbezüglicher Fragestellungen ist durch ein zweitägiges Seminar mit Vertretern nahezu aller deutscher Eichdirektionen unter Einbeziehung zentraler Polizeischulen erfolgt. Für Rotlichtüberwachungsanlagen, bei denen nunmehr die automatische Rückrechnung des Messwerts auf die jeweilige Haltelinie zum Stand der Technik geworden ist, wurden umfassende neue PTB-Anforderungen erarbeitet.

Im Fachlaboratorium *Beschleunigung* erfolgte eine Schwerpunktbildung bei den Abschlussarbeiten zur Realisierung der Rückführung von Kalibrierungen an Beschleunigungsaufnehmern mit hochintensiven Impulsen bis 100 km/s^2 (Bild 2) einschließlich erster Untersuchungen und Primärkalibrierungen an entsprechenden TransfERNormalen sowie beim Abschluss eines umfassenden internationalen Schlüsselvergleichs (Key Comparison) unter

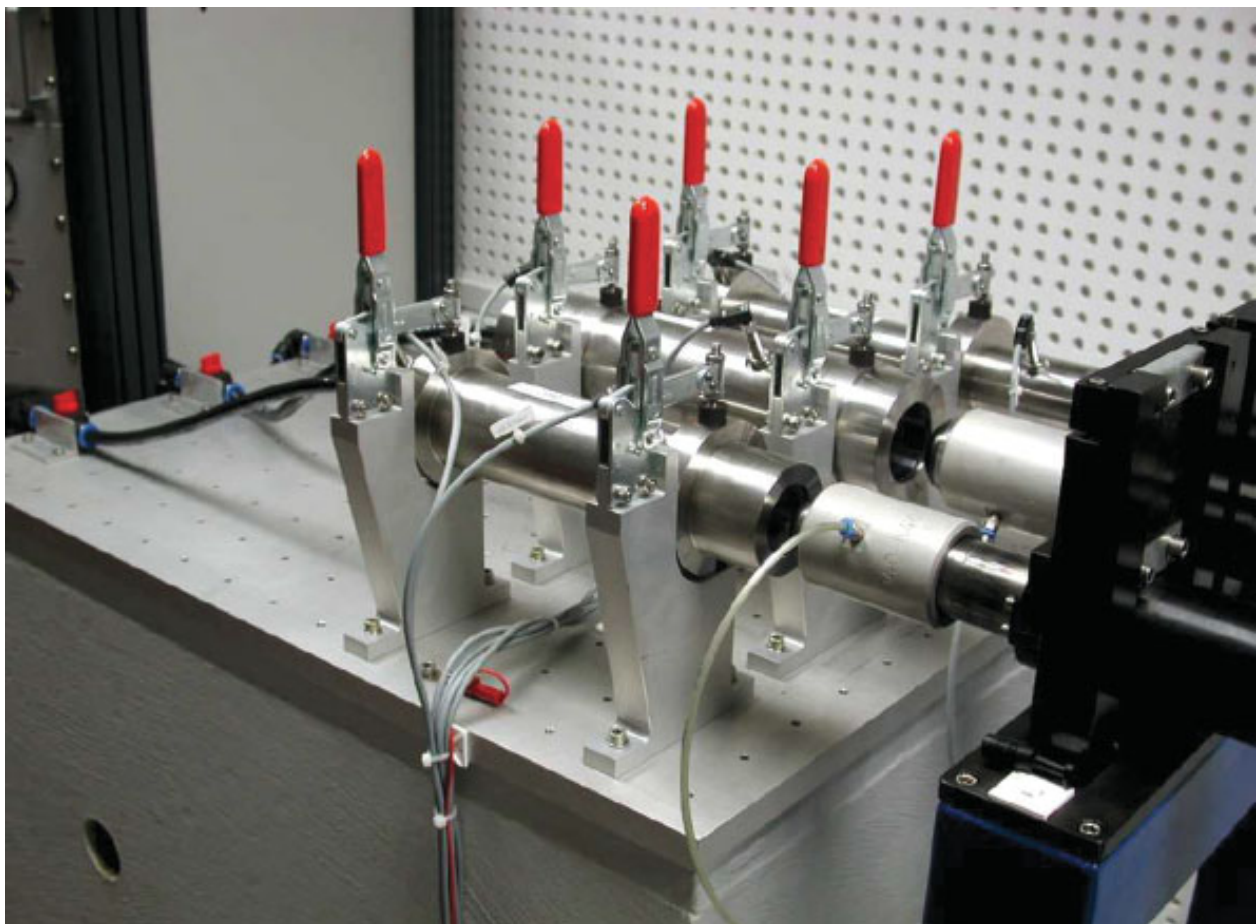
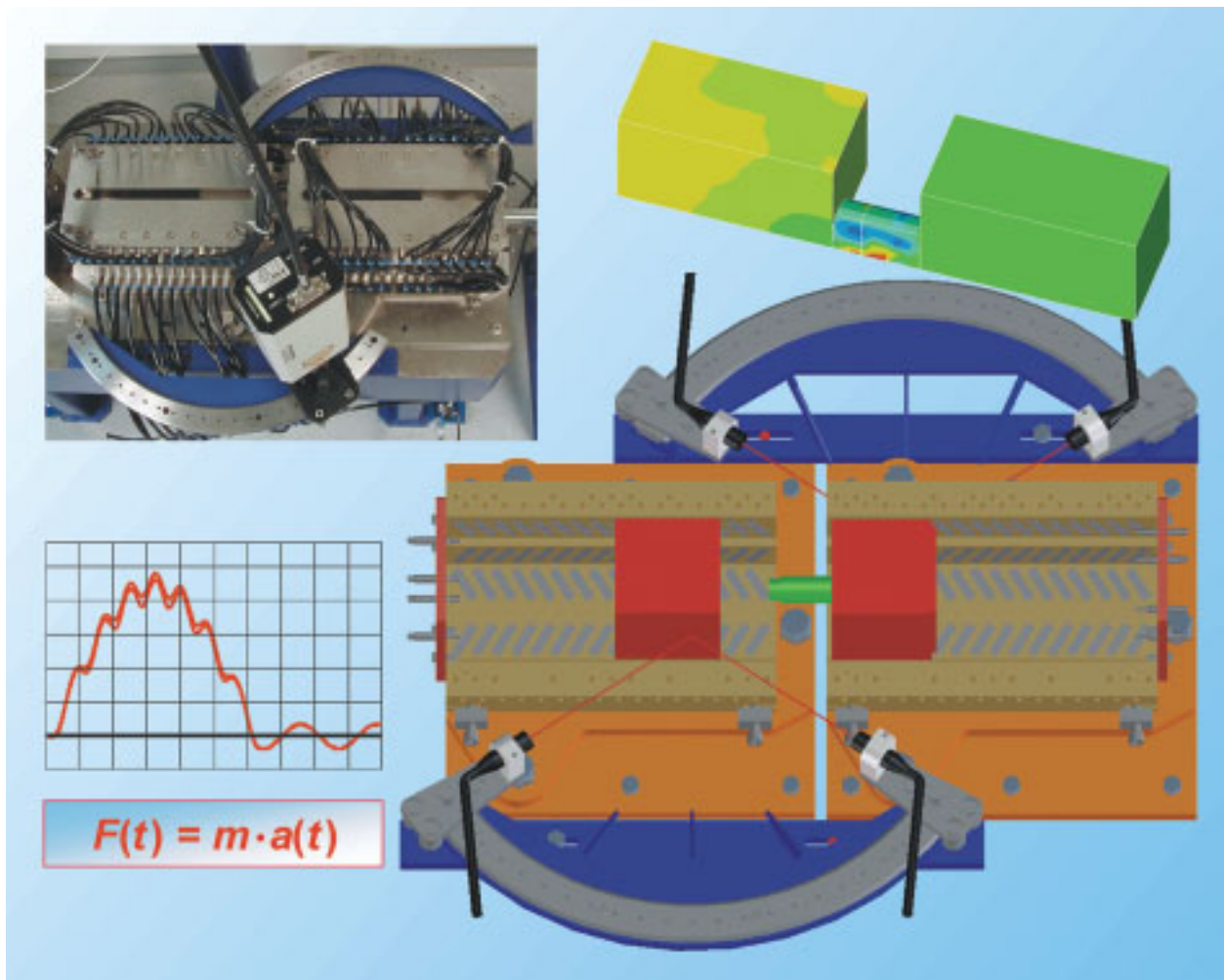
Federführung der PTB zur Messgröße Beschleunigung. An dieser Vergleichsmessung haben zwölf metrologische Staatsinstitute (NMI) teilgenommen, die fünf regionale internationale metrologische Organisationen (RMO) repräsentieren. Gemessen wurde der Ladungs-Übertragungskoeffizient von zwei als TransfERNormale ausgewählten piezoelektrischen Beschleunigungsaufnehmern auf Quarzbasis im Frequenzbereich 40 Hz bis 5 kHz. Es zeigte sich u. a., dass bei der Bezugfrequenz von 160 Hz bei allen Kalibrierungen relative Abweichungen von kleiner als $5 \cdot 10^{-3}$ vom Referenzwert (gewichteter Mittelwert aller NMI) erzielt wurden. Die PTB hat unter allen Messbedingungen (22 verschiedene Frequenzen, beide TransfERNormale) relative Abweichungen $< 1 \cdot 10^{-3}$ vom jeweiligen Referenzwert erreicht und damit die bei den Vergleichsmessungen angegebene kleinste relative Messunsicherheit 0,1 % (erweiterte Messunsicherheit für $k = 2$) nachgewiesen.

Fluidmechanik

Im Fachlaboratorium *Strömungsmesstechnik* wurden für die Untersuchung von Strömungsprofilen und Grenzschichten LDA-Messverfahren entwickelt und in Windkanälen erprobt. Hierdurch wird es auch mit z. T. kommerziellen Laser-Doppler-Anemometer-Systemen möglich, innerhalb des Messvolumens Geschwindigkeitsmessungen mit hoher Ortsauflösung durchzuführen. Durch die Weiterentwicklung von faseroptischen Verfahren konnten ohne Traversierung des Sensors bereits ortsaufgelöste Geschwindigkeitsmessungen über eine Länge von 100 mm realisiert werden. Diese Arbeiten sind Voruntersuchungen zur Entwicklung geeigneter Sensoren für die Messung von Geschwindigkeitsprofilen in Rohrleitungen und an Düsen. Das Fernziel ist deren Einsatz für die Durchflussmessung im Bereich der Hochdruck-Erdgasmessung.

Bild 1 (oben): Kraftstoß-Normalmesseinrichtung zur direkten Rückführung stoßförmiger Kräfte bis 20 kN über die Größen Masse und Beschleunigung (Foto: oben links; FEM-Modell: oben rechts; simulierter Signalverlauf: unten links; CAD-Zeichnung: unten rechts)

Bild 2 (unten): Hochintensitäts-Stoßbeschleunigungs-Normalmesseinrichtung; Stoßerzeugung mittels Stahlkugel-Paaren



Darüber hinaus haben weiterführende Untersuchungen zur Doppler-Global-Velozimetrie Möglichkeiten aufgezeigt, mit vereinfachten Messanordnungen an mehreren Messpunkten gleichzeitig On-line-Geschwindigkeitsmessungen durchzuführen. Hierdurch werden neue Möglichkeiten zur Untersuchung komplexer Strömungsvorgänge eröffnet.

Im Fachlaboratorium *Flüssigkeitsmessgeräte* konzentrierten sich die Aktivitäten vor allem auf die Aufnahme des regulären Messbetriebs des Hydrodynamischen Prüffelds. Erste Untersuchungen an Massedurchflussmessgeräten wurden erfolgreich durchgeführt. Sie sind Ausgangspunkt für ein sehr umfangreiches Forschungsprogramm zur Entwicklung leistungsfähiger Transfernormale zur Übertragung der hochgenauen Messergebnisse, die mit Hilfe des Hydrodynamischen Prüffelds mit Wasser erreicht werden, auf nachgeordnete Messeinrichtungen, die nicht nur mit Wasser, sondern auch mit anderen Prüfmedien wie z. B. Heizöl, Diesel, Benzin oder langfristig ggf. auch Erdgas arbeiten.

Ein anderer wichtiger Aufgabenkomplex befasste sich mit dem Vorschriftenwesen, in dem für ein vollkommen neuartiges Messverfahren – die elektronische Füllstandsmessung in Tankwagen – PTB-Anforderungen erarbeitet und damit einheitliche Voraussetzungen für die Zulassung solcher Messsysteme für den eichpflichtigen Verkehr geschaffen wurden. Dieses neue Messverfahren bietet eine Reihe von Vorteilen, die u. a. in einem verbesserten Preis-Leistungs-Verhältnis und vor allem in einem deutlich verringerten Manipulationsrisiko liegen. Sowohl an das Füllstandsmesssystem (erstmal mobil verwendet) als auch an den Transportbehälter (Straßentankwagen, der nun die Funktion eines Messbehälters übernimmt,) waren neue Anforderungen zu stellen, die in die Zuständigkeit unterschiedlicher Anlagen der Eichordnung fallen und durch die existierenden Vorschriften nicht abgedeckt wurden. Es erschien deshalb als zweckmäßig, für Transport-Messbehälter mit elektronischer Füllstandsmessung die entsprechenden bauart-spezifischen PTB-Anforderungen in einer gesonderten Vorschrift zu formulieren.

Im Fachlaboratorium *Gasmessgeräte* ist als besonderes Ereignis die erstmals durchgeführte, kontinentüberspannende Telekalibrierung auf dem Gebiet der Hochdruck-Erdgasmessung zu nennen. Anlässlich des „5th International Symposium for Fluid Flow Measurements“ im April 2002 wurde mittels einer TV-Liveschaltung von Washington aus der Ablauf der Kalibrierung eines Hochdruckgaszählers auf dem Prüfstand „pigsar“ der Ruhrgas AG in Dorsten online demonstriert. Die Teilnehmer des Symposiums konnten die Prüfpunkte des Hochdruckgaszählers selbst festlegen und den Aufbau des Messergebnisses am Bildschirm verfolgen. Die Erläuterungen und Vorführungen wurden mit außerordentlich großem Interesse aufgenommen.

Im Fachlaboratorium selbst wurden umfangreiche Anstrengungen unternommen, um die Messmöglichkeiten entsprechend der zunehmenden Nachfragen auch auf dem Gebiet der Anemometerkalibrierungen und -untersuchungen zu erweitern. Es wurde ein neuer Windkanal in Betrieb genommen (Bild 3), der für Messungen an Anemometern mit einem maximalen Durchmesser bis 100 mm in einem Geschwindigkeitsbereich zwischen 0,5 m/s und 80 m/s eingesetzt werden kann. Die Notwendigkeit für diesen Windkanal war entstanden, da rückführbare Kalibrierungen von Anemometern vor allem in der Windenergie- und Klimatisierungstechnik sowie in der Umweltmesstechnik immer mehr an Bedeutung erlangen. Der Windkanal soll darüber hinaus zur Untersuchung von speziellen Strömungseffekten sowie zur Erprobung neuer Strömungssensoren eingesetzt werden.

Akustik

Gehörmessungen beim Ohrenarzt werden je nach Art der Hörstörung und nach dem Lärmpegel im Untersuchungsraum mit verschiedenen Arten von Audiometrie-Kopfhörern ausgeführt. Nach Art der Schallzuführung zum Ohr unterscheidet man circumaurale, supraaurale, Concha- und Einsteck-Hörer. Zur Kalibrierung von Audiometern musste bisher für jede Kopfhörerart ein anderer Ohrsimulator verwendet werden. Diese „künstlichen Ohren“ gewährleiten zwar eine höchstmögliche Reproduzierbarkeit der Messung, sie liefern aber leider keine

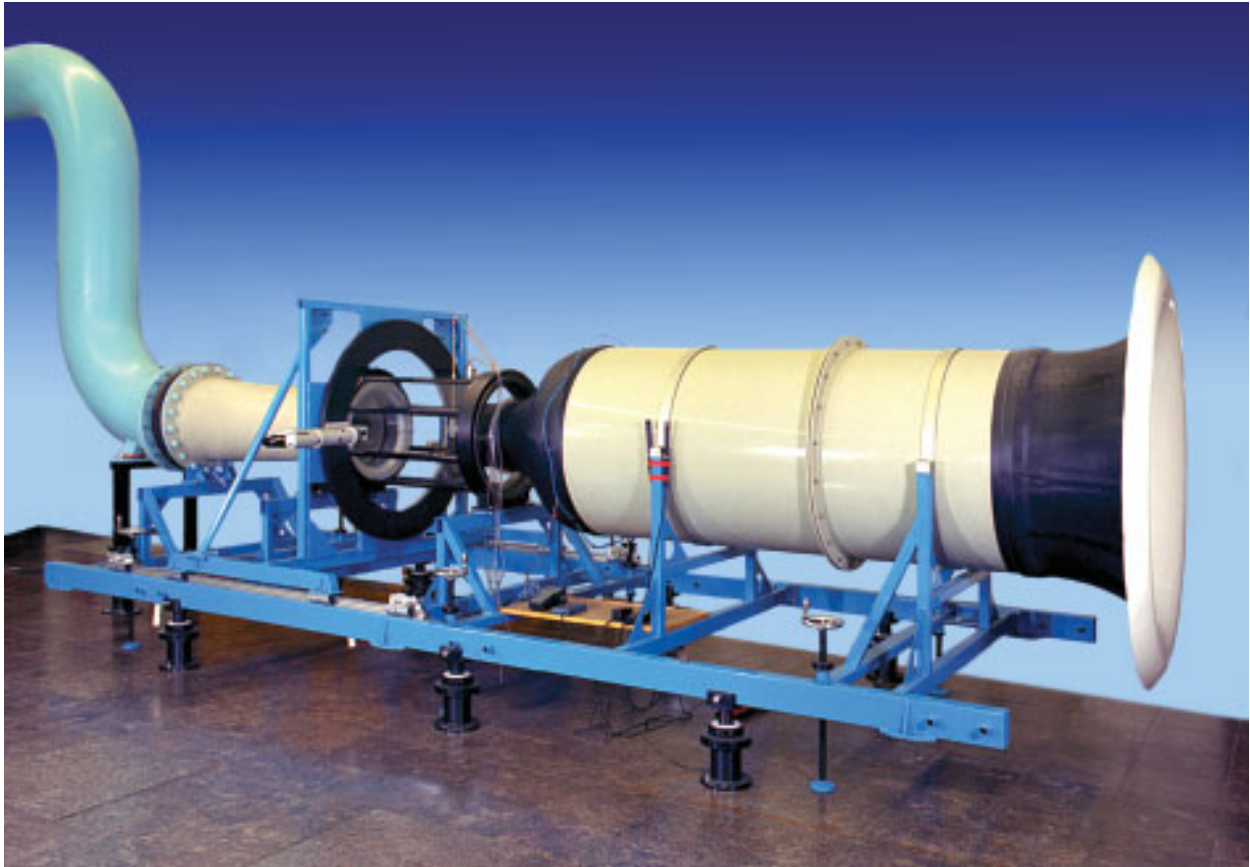


Bild 3: Gesamtansicht des neuen Windkanals zur Kalibrierung von Anemometern in der Windenergie- und Umweltmesstechnik

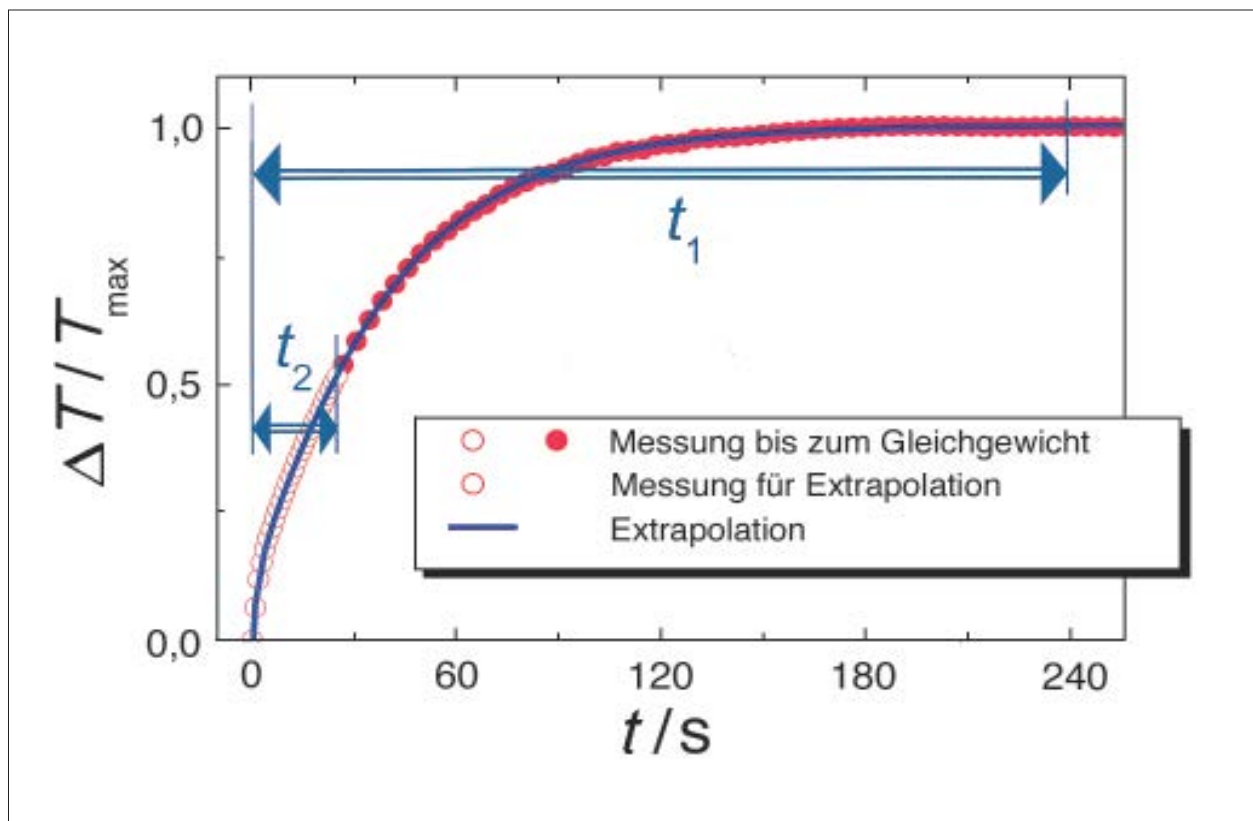


Bild 4: Typische Aufheizkurve für einen thermoakustischen Ultraschallsensor

einheitlichen, sondern sehr unterschiedliche Schalldruckpegel für die menschliche Hörschwelle. Für neue Audiometrie-Kopfhörer muss daher in der Regel die zugehörige Bezugshörschwelle durch subjektive Untersuchungen neu bestimmt werden.

Zurzeit laufen im Fachlaboratorium *Grundlagen der Schallmessung* umfangreiche Untersuchungen, einen Ohrsimulator zu entwickeln, der zur Messung aller Arten von Kopfhörern geeignet ist und wesentlich einheitlichere Hörschwellen bei ausreichender Reproduzierbarkeit liefert. Dazu wurden alle funktionellen Teile des menschlichen Außenohrs, wie Trommelfell, Gehörgang, Concha, Pinna und Ohrumgebung, mit möglichst einfachen geometrischen Elementen nachgebildet. Es wurden sowohl kommerziell erhältliche als auch in der PTB gefertigte Formteile verwendet. Erste Messungen zeigen, dass der vorläufige Prototyp alle Kopfhörerarten zu kalibrieren gestattet. Die Reproduzierbarkeit ist zufriedenstellend ($< 0,9$ dB) für Frequenzen zwischen 125 Hz und 5 kHz, aber noch nicht ausreichend für Frequenzen oberhalb 5 kHz. Die bei dieser Entwicklung gesammelten Erfahrungen sollen später bei der Neuentwicklung eines dringend benötigten Ohrsimulators für Kinder verwendet werden.

Thermoakustische Sensoren stellen eine einfache und kostengünstige Alternative zu anderen Messverfahren zur Bestimmung der abgegebenen Ultraschalleistung dar. Solche Exposimetrie-Messungen sind im Hinblick auf die Patientensicherheit und die Qualitätssicherung von medizinischen Ultraschallgeräten von großer Bedeutung. Das thermoakustische Messverfahren basiert auf der Umwandlung der einfallenden akustischen Energie in Wärme im Innern eines Ultraschallabsorbers und der Detektion der erzeugten Temperaturerhöhung auf der Rückseite des Absorbers. Typischerweise wird die auf den Absorber treffende Schalleistung aus der Messung der Temperaturerhöhung im thermischen Gleichgewicht abgeleitet. Da sowohl die erzeugte Temperaturerhöhung als auch die Zeit bis zum Erreichen des Gleichgewichts mit wachsender Absorberlänge zunehmen, muss bei der Auslegung der Sensoren ein Kompromiss zwischen der erreichbaren Empfindlichkeit und der notwendigen Mess-

zeit eingegangen werden. Dieser Kompromiss kann durch einen neuartigen Ansatz umgangen werden, bei dem die transienten Aufheizkurven ausgewertet werden, so dass eine erhebliche Verkürzung der Messzeiten erreicht werden kann.

Im Fachlaboratorium *Ultraschall* wurden die zeitabhängigen Aufheizkurven für unterschiedliche Absorbergeometrien bei diversen Ultraschallfrequenzen experimentell ermittelt. Eine adäquate numerische Beschreibung der Temperaturkurven erfolgte in Anlehnung an eine kürzlich veröffentlichte analytische Lösung mithilfe einer Fit-Prozedur. Wenn ein spezifischer Sensor zunächst durch einen auf diese Weise gewonnenen Satz von Parametern charakterisiert worden ist, kann er anschließend zur Schallintensitätsmessung verwendet werden, wobei sich die Messzeit typischerweise auf ein Zehntel der erforderlichen Zeit bei Auswertung der Gleichgewichtstemperatur reduziert (Bild 4). Dadurch wird die praktische Anwendbarkeit des thermoakustischen Sensorkonzepts erheblich verbessert, was insbesondere für die Untersuchung der weit verbreiteten diagnostischen Ultraschallgeräte von Vorteil ist.

Im Mittelpunkt der internationalen Zusammenarbeit standen die Aktivitäten im Rahmen des Beratenden Komitees für Akustik, Ultraschall und Schwingungen (CCAUV) und der Regionalen Metrologieorganisationen (RMO) EUROMET und COOMET. Von den fünf bei dem ersten Treffen des CCAUV im Jahre 1999 beschlossenen Key Comparisons (KC) konnten drei auf der diesjährigen Tagung abschließend diskutiert werden; die beiden anderen stehen kurz vor dem Abschluss. Die Berichte zu den beiden Vergleichen auf den Gebieten der Ultraschalleistungsmessung und der Schwingungsmesstechnik, für die die PTB die Pilotfunktion übernommen hatte, wurden ohne Einwände genehmigt. Ebenfalls genehmigt wurde der Bericht zum KC „Kalibrierung von Laboratoriums-Normalmikrofonen“, für dessen Leitung das NPL (UK) zuständig war. Erwähnt werden sollte auch ein in diesem Jahr gestarteter COOMET-KC „Kalibrierung von Laboratoriums-Normalmikrofonen“, an dem fünf osteuropäische Metrologieinstitute teilnehmen und bei dem die PTB die Pilotfunktion übernommen hat.

In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

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

Grundlagen der Metrologie

Stoßkräfte werden mit Laser-Doppler-Interferometern rückführbar gemessen

Erstmals konnte mit zwei Laser-Doppler-Interferometern die Eignung dieses optischen Messverfahrens zur rückführbaren Messung von Stoßkräften demonstriert werden. (1.1, 1.13)

Erzeugung eines Goldionenstrahles mit einer Stromstärke von 0,8 mA

Mit dem Experiment Ionenakkumulation wird angestrebt, das Kilogramm durch Anbindung an eine Atommasse neu zu definieren. Der dazu erforderliche Ionenstrahl wurde mit Hilfe von massenspektroskopischen Untersuchungen auf seine Zusammensetzung untersucht. Es ist außerdem gelungen, einen Goldionenstrahl mit einer Stromstärke von 0,8 mA zu erzeugen. (1.11)

Bestimmung der ionenoptischen Parameter beim Experiment Ionenakkumulation für die Transmission mit maximaler Emittanz

Die Emittanz eines Ionenstrahls ist das von einem gegebenen Ensemble von Ionen besetzte Phasenraumvolumen und ein wichtiger Parameter für den Ionen-transport. Mittels ionenoptischer Rechnungen wurde ein Maximum der Emittanz gefunden, bei der der Ionenstrahl noch verlustfrei durch das ionenoptische System beim Experiment Ionenakkumulation transportiert werden kann. (1.11)

Temperaturabhängigkeit einer Hochfrequenz-Quarzmikrowaage

Beim Experiment Ionenakkumulation ist es erforderlich, die bei der Akkumulation zurückgestreuten atomaren Partikel nachzuweisen. Als Detektor wird ein System von Hochfrequenz-Quarzmikrowaagen dienen. Voruntersuchungen zur Temperaturabhängigkeit haben gezeigt, dass solche Quarzwaagen für den Nachweis geeignet sind. (1.11)

Neue Kraftmesseinrichtung von 10 mN bis 10 N

Kleine Kräfte in dem für die Mikrosystemtechnik und Nanotechnologie interessanten mN- und μ N-Bereich können mit Hilfe von Kompensationswaagen bestimmt werden. Eine erste Messeinrichtung erschließt den Bereich von 10 mN bis 10 N. (1.12)

Mehrkomponentenkraftaufnehmer zeigen komplexes dynamisches Verhalten

Es wurden erstmalig dynamische Untersuchungen an Mehrkomponentenaufnehmern für Kraft und Drehmoment durchgeführt. Die untersuchten Aufnehmer zeigen ein sehr komplexes dynamisches Verhalten, das auf die mechanische Struktur der Sensoren zurückzuführen ist. Zur Deutung und Interpretation der Messergebnisse wurden Berechnungen nach der Methode der Finiten Elemente durchgeführt. (1.12)

Projekt einer Mehrkomponenten-Referenzmesseinrichtung

Eine Mehrkomponenten-Referenzmesseinrichtung wurde projektiert, die unter Nutzung einer Hexapodenanordnung von Kraftaufnehmern bzw. Antrieben die Darstellung und Messung von räumlich beliebig gerichteten Kräften (bis 10 kN) und Momenten (bis 1 kN · m) gestatten soll. (1.13)

Mehrdimensionale Strömungsgeschwindigkeitsmessung – Kanaltrennung trotz gleicher Trägerfrequenzen?

Konventionelle Laser-Doppler-Anemometer nutzen für mehrdimensionale Strömungsgeschwindigkeitsmessungen unterschiedliche Laserwellenlängen oder unterschiedliche Trägerfrequenzen mit einem Abstand von mindestens der doppelten maximal auftretenden Dopplerfrequenz. Es wurde erstmals gezeigt, dass mit verdrauschten, nominell gleichen Trägerfrequenzen eine Kanaltrennung möglich ist und eine Erweiterung auf mehrdimensionale Messungen ohne Vergrößerung der Systembandbreite vorgenommen werden kann. (1.31)

Neuer Windkanal für die Kalibrierung von Anemometern für Geschwindigkeiten bis 80 m/s in Betrieb genommen

Ein temperaturstabilisierter, turbulenzarmer Windkanal mit einem Düsendurchmesser von 318 mm ermöglicht höchste Genauigkeiten, auch wenn die zu kalibrierenden Anemometer etwas größere geometrische Abmessungen (z. B. Durchmesser bis 100 mm) aufweisen. (1.33)

Metrologie für die Wirtschaft

Mikrosensor zur Spannungsanalyse in der Bauwerksüberwachung

Das frühzeitige Erkennen von Schäden ermöglicht erhebliche Kostensenkungen in der Bauwerkserhaltung. Eine hierfür geeignete Messtechnik wird an der PTB entwickelt. (1)

Erweiterte Kalibriermöglichkeiten für Beschleunigungsaufnehmer

Ein in der PTB entwickeltes neuartiges Messverfahren hat zum Aufbau eines Kalibriermessplatzes für Beschleunigungsaufnehmer geführt, mit dem resonanzfreie Stoßanregung mit nahezu freier Wahl der Amplitude und der Dauer des Stoßes möglich ist. (1.22)

Neuentwickeltes Verfahren zur Kalibrierung einer Rohrprüfstrecke

Ein neuentwickeltes geometrisches Verfahren für die Kalibrierung einer Rohrprüfstrecke liefert im Vergleich zu konventionellen Methoden einen höheren Informationsgehalt. (1.32)

Dynamische Wägung in Durchfluss-Kalibriereinrichtungen für Flüssigkeiten

Durch die Anwendung des Prinzips der dynamischen Wägung in gravimetrischen Durchflusskalibriereinrichtungen für Flüssigkeiten kann im Vergleich zur statischen Wägung die Kalibrierzeit wesentlich reduziert werden, ohne dass dabei unter dem Gesichtspunkt industrieller Anforderungen eine merkliche Verschlechterung der Messunsicherheit auftritt. (1.32)

Halbierte Polyeder-Lautsprecher für den Halbfreifeldraum

Für die Beurteilung von Halbfreifeldräumen werden isotrope Schallquellen benötigt. Verschiedene halbierte Polyederanordnungen wurden auf ihre Eignung untersucht. (1.42)

Metrologie für die Gesellschaft

Die Waage der Zukunft ist internetfähig

Innovative und europaweit geltende Neuregelungen ebnen den Weg zur voll-internetfähigen Waage. (1.14)

Neufassung der Anforderungen an Rotlichtüberwachungsanlagen

Wenn ein „Rotlichtsünder“ geblitzt wird, verlangt die Rechtsprechung, dass auf den Zeitpunkt der Überquerung der Haltlinie seit dem Erscheinen des Rotlichts zurückgerech-

net wird. Dem Stand der Technik folgend werden künftig Rotlichtüberwachungsanlagen nur zugelassen, wenn diese Rückrechnung automatisch erfolgt und eichamtlich überwacht werden kann. (1.21)

Erste Telekalibrierung auf dem Gebiet der Hochdruck-Erdgasmessung realisiert

Kalibrierungen und Zulassungsuntersuchungen von Hochdruck-Gaszählern auf dem nationalen Normal für Hochdruck-Erdgas „pig-sar“, das bei der Ruhrgas AG in Dorsten steht, können seit kurzem von Braunschweig aus per Telekalibrierung erledigt werden. (1.33)

3. Internationaler Ringvergleich zur Raumakustischen Simulation abgeschlossen

21 Teilnehmer aus 15 Ländern waren am III. Round Robin beteiligt, bei dem das Musikstudio der PTB als Versuchsobjekt für die Berechnung der Raumakustischen Parameter nach ISO 3382 diente. (1.401)

Meteorologische Einflüsse in der Bauakustik

Durch Berücksichtigung von Luftdruck- und Temperaturschwankungen bei bauakustischen Messungen konnte die Unsicherheit verringert werden. (1.42)

Trittschallverbesserung auf Holzbalkendecken

Vereinfachte Messung der Trittschallminderung auf Holzdecken bei leichten, biegeweichen Bodenauflagen möglich. (1.42)

Bestimmung der Phase der Empfindlichkeit von Hydrophonen

Für die korrekte Auswertung von Impulsmessungen – besonders im medizinischen Bereich – ist die komplexwertige Übertragungsfunktion, d. h. eine Bestimmung der Phase der Hydrophonempfindlichkeit notwendig. Die Phase wurde im Fachlaboratorium Ultraschall mit zwei neuartigen Verfahren bestimmt. (1.43)

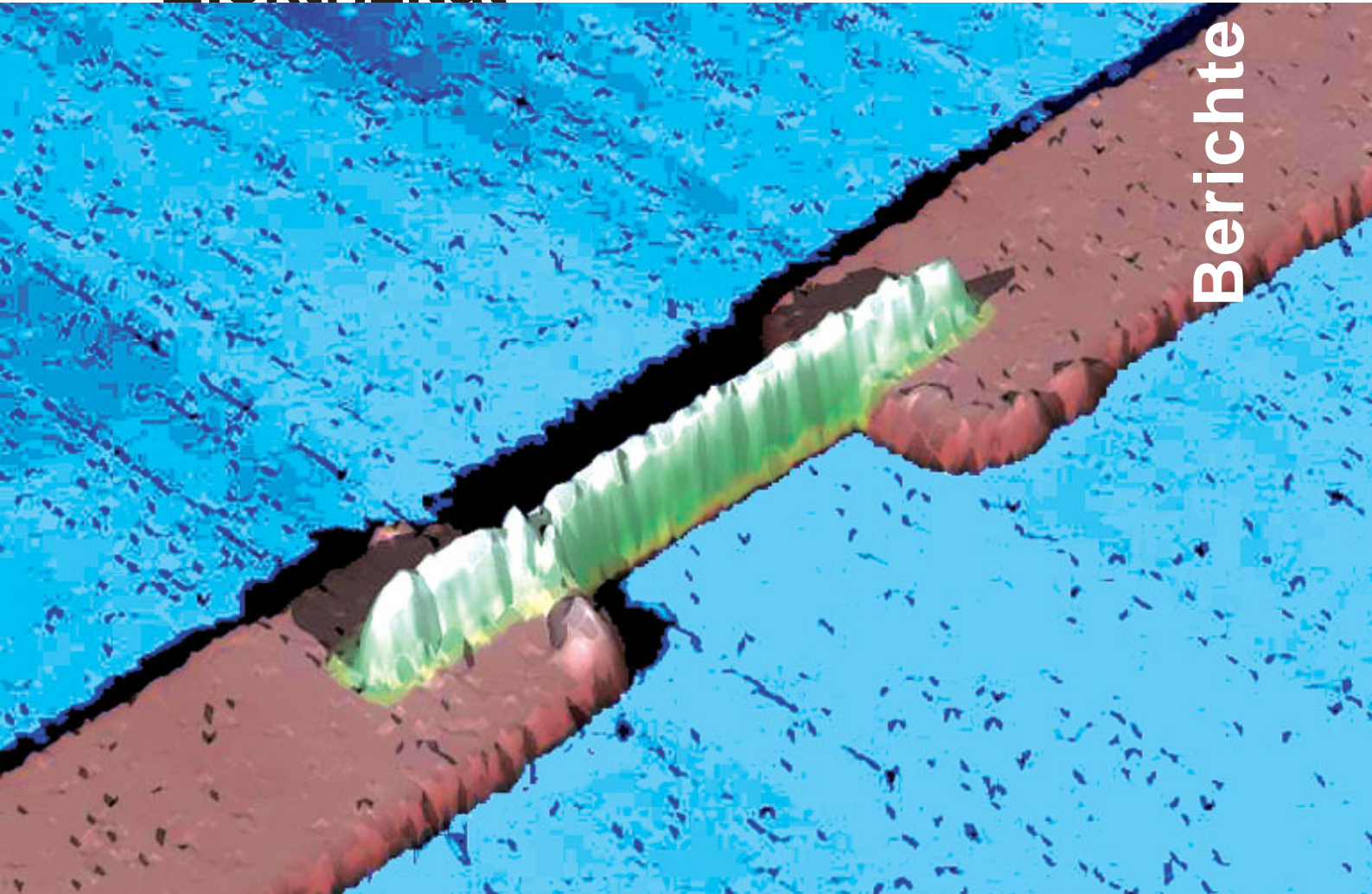
Internationale Angelegenheiten

CIPM key comparison CCAUV.U-K1

Die Ultraschallleistung ist eine wichtige Kenngröße zur Charakterisierung von medizinischen Ultraschallgeräten. Durch die Vergleichsmessung wird die Einheit der Ultraschallleistung weitergegeben und trägt so zur weltweiten Umsetzung des Mutual Recognition Arrangements bei. (1.43)

Elektrizität

Berichte der Abteilungen



Elektrizität

Die Abteilung *Elektrizität* der PTB bearbeitet die Gebiete *Gleichstrom und Niederfrequenz, Hochfrequenz und Magnetismus, Elektrische Energiemesstechnik* und *Quantenelektronik*. Diese vier Fachbereiche führen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten auf dem Gebiet der elektrischen Präzisionsmesstechnik durch, sind mit der Darstellung und Bewahrung der elektrischen Einheiten befasst und geben diese Einheiten im Rahmen des industriellen und gesetzlichen Messwesens an ihre Kunden und Partner weiter. Darüber hinaus arbeiten Mitarbeiter der Abteilung in den verschiedenen internationalen Organisationen der Metrologie mit und tragen damit zur Vereinheitlichung dieser bei.

Quantennormale für Spannung, Stromstärke und Widerstand

Führende europäische Institute, die auf dem Gebiet der Supraleitungselektronik tätig sind, haben im Mai 2002 auf Initiative des Fachbereichs *Quantenelektronik* den Verein „FLUXONICS – The European Foundry of Superconducting Electronics e. V.“ gegründet. Die PTB ist ebenfalls Mitglied und führt die Geschäftsstelle. Der Verein dient der Einrichtung einer europaweiten Infrastruktur für Forschung und Entwicklung und der Förderung zur Herstellung von supraleitender Elektronik. Mit FLUXONICS ist ein Instrument eingerichtet worden, mit dem die Herstellung integrierter supraleitender Schaltungen langfristig in einer mit den europäischen Partnern abgestimmten Foundry gesichert werden soll und mit dem innovative Technologieentwicklungen in Europa initiiert und effektiv umgesetzt werden können.

Titelbild

Raster-Kraftmikroskop-Aufnahme einer mittels additiver Lithographie hergestellten Leiterbahn zwischen zwei photolithographisch erzeugten Elektroden (Länge: 1,5 μm , Breite: 100 nm) Verglichen mit einem menschlichen Haar entspricht die Länge der Leitung 1/30 und die Breite 1/500 Haardurchmesser.

Die Forschungsaktivitäten der Abteilung auf dem Gebiet der Josephson-Spannungsnormale konzentrieren sich jetzt auf programmierbare Spannungsnormale. In Zusammenarbeit mit dem *National Physical Laboratory* (NPL) in Großbritannien wurde mit der Entwicklung eines Wechselspannungsnormals begonnen, das auf einem 14-bit-Josephson-D/A-Konverter basiert und bei einer Frequenz von 70 GHz Spannungen bis zu 1,2 V erzeugt. Theoretische Abschätzungen haben gezeigt, dass sich mit dem neuen Normal Wechselspannungen bis zu einer Frequenz von 100 Hz mit einer relativen Unsicherheit von $2 \cdot 10^{-8}$ erzeugen lassen sollten. Dies würde für die Wechselspannungsmesstechnik bei tiefen Frequenzen eine deutliche Verringerung der Messunsicherheit um mindestens einen Faktor 10 bedeuten.

Erstmalig ist in der PTB ein direkter Vergleich von Serienschaltungen für programmierbare Josephson-Spannungsnormale vorgenommen worden. Dazu wurde eine Schaltung, bestehend aus mehr als 8000 SINIS-Kontakten, in der Mitte geteilt und die bei Einstrahlung einer Mikrowelle erzeugten Spannungen von etwa 0,6 V gegeneinandergeschaltet. Eventuell vorhandene Spannungsdifferenzen wurden mit einem SQUID detektiert. Sie waren kleiner als $7 \cdot 10^{-19}$ V und wurden bestimmt durch die Nachweisgrenze auf Grund externer Störungen sowie der Auflösung des verwendeten SQUID. Es wird erwartet, dass sich die Nachweisgrenze mit einem optimierten Messaufbau sowie einem verbesserten SQUID noch deutlich herabsetzen lässt.

Die Frequenzstabilisierung bei Josephson-Spannungsnormalen lässt sich erheblich vereinfachen, wenn die eingestrahlte Mikrowelle direkt auf dem Chip herabgeteilt wird und der Vergleich mit der Normalfrequenz bei dieser unteretzten Frequenz erfolgt. Dazu wurde eine RSFQ-Schaltung (Rapid Single Flux Quantum) entwickelt, die in zwölf Tei-

lerstufen die Frequenz auf einen Wert herabteilt, bei dem ein direkter Vergleich mit einer Normalfrequenz möglich ist. Zur Beurteilung der Einsatzfähigkeit der einzelnen Teilerstufen wurde eine 3-bit-Experimentierschaltung hergestellt und erfolgreich getestet.

Die Forschungen an metallischen Einzelelektronenschaltungen konzentrierten sich auf die folgenden Gebiete:

- Schaltungen zur Erzeugung hochgenauer Stromstärken auf der Grundlage einzelner Ladungsquanten
- Messung kleiner Supraströme in supraleitenden Ringen mit Josephson-Tunnelementen
- Entwicklung hochempfindlicher Cooper-Paar-Elektrometer für genaue Ladungsmessungen und Quantum Computing und
- Entwicklung von Technologien zur Herstellung kleiner Josephson-Tunnelemente und Einzelelektronen-Transistoren.

Mittels einer neuen Maskentechnik konnten erstmalig Josephsonkontakte und Einzelelektronen-Transistoren auf Niobbasis hergestellt werden. Sie zeichnen sich durch eine hohe Energielücke und kleine Kapazitäten aus und zeigten sowohl im normalleitenden als auch im supraleitenden Betrieb eine gute Periodizität in ganzen Vielfachen der Elementarladung.

Erstmals ist das resonante Tunneln einzelner Elektronen durch zwei vertikal gekoppelte Halbleiter-Quantenpunkte nachgewiesen worden. Die Quantenpunkte wurden durch selbstorganisiertes Wachstum erzeugt, wobei die exakte Ausrichtung des Quantenpunkts in der oberen Ebene durch die von dem Quantenpunkt in der unteren Ebene hervorgerufenen Verspannungen erfolgt (Bild 1). Wie beim Tunneln durch einzelne Quantenpunkte treten auch hier Stufen in den Kennlinien auf, die einem einzelnen Zustand des stark gekoppelten Doppel-Quantenpunkts zugeordnet werden können, der in diesem Falle als ein künstliches Molekül betrachtet werden kann.

Für den Einsatz von Quantenpunkten in optoelektronischen Bauelementen oder als Normale für die elektrische Stromstärke ist es entscheidend, das Verhalten von Elektronen in den angeregten Zuständen von Quantenpunkten zu verstehen. Dies erreicht man

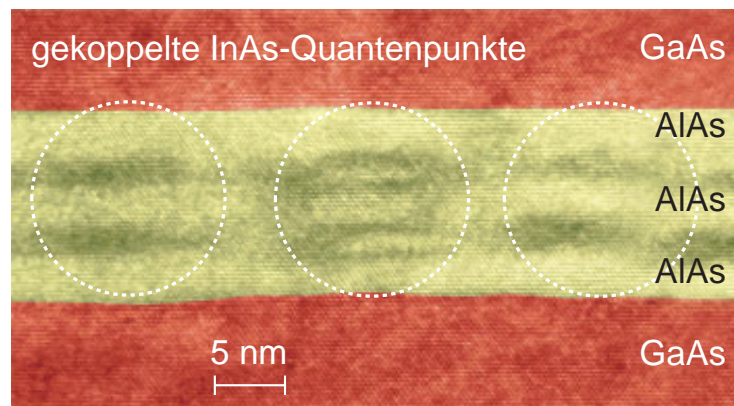


Bild 1: Zwei gestapelte Indiumarsenid-Quantenpunkte in einer Aluminiumarsenid-Barriere, aufgenommen mit einem hochauflösenden Transmissions-Elektronen-Mikroskop

durch Lebensdauermessungen zwischen Anregung eines Elektrons und Aussendung eines Lichtquants beim Übergang in den niederenergetischen Zustand. Bei mit einer Barriere umgebenen Quantenpunkten wurde jetzt eine deutliche Verlängerung der Lebensdauer der angeregten Elektronen beobachtet, die beträchtliche Auswirkungen auf die Effizienz von Quantenpunkten für optoelektronische Anwendungen haben könnte.

Halbleiter-Schichtkristalle bilden die Grundlage für Bauelemente der Optoelektronik, sie erlauben aber auch eine Reproduzierung der Widerstandseinheit mit höchster Präzision. Ihre Eignung für den jeweiligen Anwendungszweck wird entscheidend von der Qualität der inneren Grenzflächen bestimmt (Bild 2), die wiederum in starkem Maße vom Herstellungsprozess abhängt. Gemeinsam mit der *Universität Marburg* wurde eine Methode weiter entwickelt, die einen direkten Vergleich optischer, elektrischer und topographischer Messergebnisse und damit eine Optimierung der Wachstumsprozesse erlaubt.

Ein in der Abteilung vorhandenes Elektronenstrahl-Lithographie-System wurde um einen Zusatz erweitert, mit dem sich durch Wechselwirkung mit dem Elektronenstrahl direkt aus der Gasphase Strukturen auf einem Substrat abscheiden lassen. Dieses Verfahren wird als additive Lithographie bezeichnet. Zu Demonstrationszwecken wurde auf einem vorstrukturierten Substrat zwischen zwei Elektroden eine nur 1,5 μm lange Leiterbahn abgeschieden (s. Titelbild).

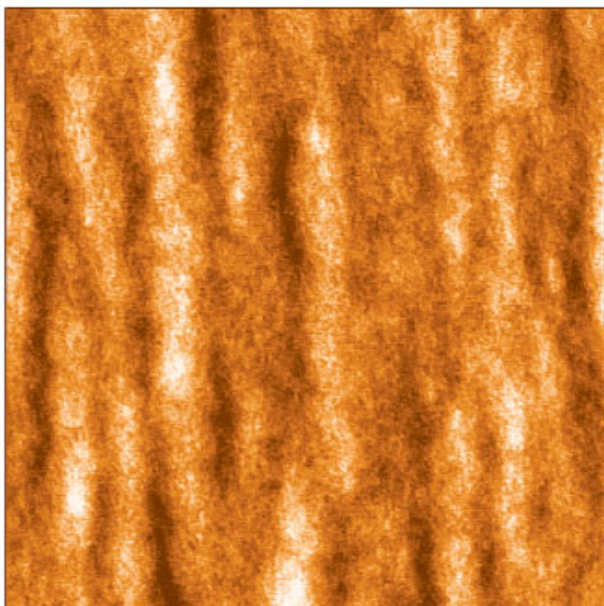
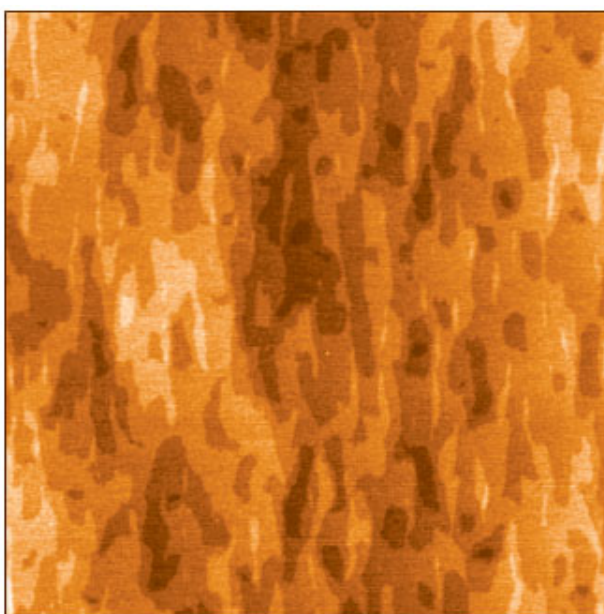


Bild 2: Unterschiedliche Topographien innerer Grenzflächen. Eine Wachstumsunterbrechung führte bei der unteren Fläche zu einer Ausglättung durch partielle Terrassenbildung.



Mit einem neu entwickelten Kernresonanzmagnetometer ist es erstmals gelungen, Felder bei einer Flussdichte von 150 mT mit einer Auflösung von 10 nT zu messen. Damit können durch Verwendung unterschiedlicher Probensubstanzen mögliche systematische Messfehler von NMR-Magnetometern nachgewiesen werden.

Als Referenzlabor für magnetische Speichermedien entwickelt die PTB Referenzmaterialien zur Charakterisierung von Disketten, Identifikationskarten und dünnen biegsamen Karten. Zurzeit laufen im Rahmen von Normungsvorhaben gerade Projekte zur Erstellung von Referenzmaterial für Magnetstreifen hoher Aufzeichnungsdichte und zur Bestimmung des Verschleißes von Magnetstreifen. Daneben wird an einem Messplatz für kleinste Strukturen auf magnetischen Datenträgern gearbeitet (Bild 3), dessen Positioniergenauigkeit auf 50 nm gesteigert werden konnte. In Zusammenarbeit mit der *TU Braunschweig* wird ein Projekt zur Ortung und Vermessung der Eigenschaften von magnetischen Nanopartikeln bearbeitet. Den Datenspeichern der nächsten Generation war auch ein Seminar zum Thema „Magnetische Dünnschichtmedien, DVD, Halbleiterspeicher, ... – was kommt danach?“ gewidmet, das wie seine beiden Vorgänger wieder von einer großen Zahl von Fachleuten aus Industrie, Universitäten und Forschungseinrichtungen besucht wurde.

Magnetische Messtechnik und Referenzmaterialien

Die Messung magnetischer Felder im Gleichstrom- und Niederfrequenzbereich steht im Zeichen einer Modernisierung und Automatisierung von Messverfahren. Zur Messung des Feldprofils von Spulen wurde eine auf einem Saturationskern-Magnetometer basierende Anlage aufgebaut. Diese Feldspulen dienen als Normale für die magnetische Flussdichte und werden in der Industrie als Magnetfeldnormale oder zur Bestimmung des Moments hartmagnetischer Materialien eingesetzt. Umgekehrt werden hochgenaue Magnetometer benötigt, um die magnetische Flussdichte über einen weiten Bereich messen zu können.

Neue Wege in der Energiemesstechnik

Die bereits früher vorgestellte Messeinrichtung zur stabilen Erzeugung und präzisen Messung von Wirk-, Blind- und Scheinleistung mittels Abtastverfahren wurde als primäres Normal für elektrische Leistung und Energie der PTB in Betrieb genommen und gleichzeitig in ihren Strom- und Spannungsbereichen erweitert (Bild 4). Damit können jetzt alle von der Industrie und den staatlich anerkannten Prüfstellen eingereichten Transfernormale mit einer bisher nicht erreichten Genauigkeit kalibriert werden. Durch Know-

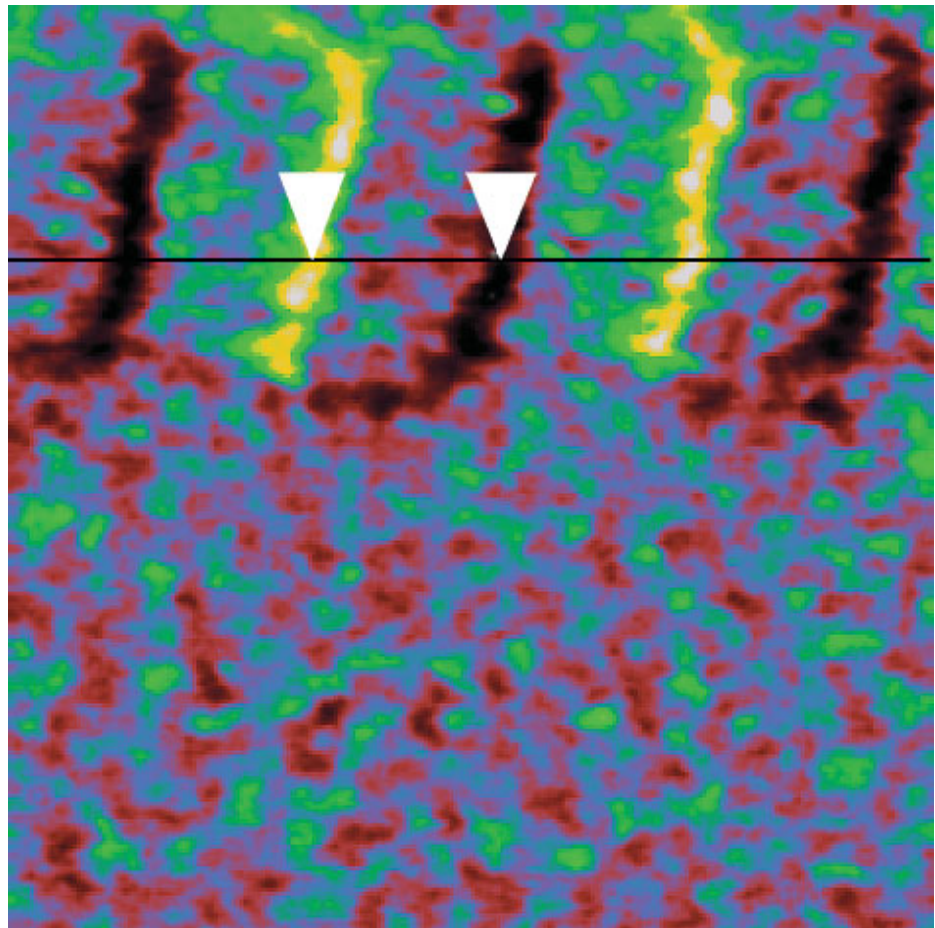


Bild 3: Grainstruktur eines modernen magnetischen Speichermediums mit zwei magnetischen Flussübergängen, untersucht mit Hilfe eines Rasterkraftmikroskops und einer Positioniereinheit hoher Auflösung. Der Abstand zwischen den weißen Dreiecken beträgt 500 nm.

How-Transfer auf ein deutsches mittelständisches Unternehmen wird dieses in die Lage versetzt, seine Produktion von Prüfzählern und Prüfeinrichtungen auf eine sicherere Basis zu stellen und gleichzeitig Kalibrierungen mit einer Messunsicherheit anzubieten, die bislang nur in der PTB erreicht werden konnte.

Auf der Basis des bereits oben beschriebenen digitalen Abtastverfahrens wurde eine Kalibriereinrichtung für Kapazitäts- und Verlustfaktorbrücken aufgebaut, die zur Beurteilung der dielektrischen Eigenschaften von Hochspannungsisolierungen in Betriebsmitteln der elektrischen Energieversorgung bezüglich Sicherheit, Qualität und Lebensdauer von besonderer Bedeutung sind. Mit dem in der PTB neu entwickelten Kalibrierverfahren können diese Brücken ohne Hochspannungsquelle und -kondensatoren bei Niederspannung kalibriert werden, wobei gleichzeitig die Messunsicherheit deutlich herabgesetzt wurde.

Neben konventionellen, nach dem transformatorischen Prinzip arbeitenden Messwandlern kommen zunehmend unkonventionelle Messwandler auf den Markt, bei denen elektronische Komponenten an der Messwertbildung und -übertragung beteiligt sind. Diese Wandler besitzen den Vorteil, dass sie gleichzeitig zu Mess- und Schutzzwecken eingesetzt werden können und damit kostengünstigere Lösungen ermöglichen. Sie stellen jedoch an die Kalibriereinrichtungen erhöhte Anforderungen, weil die unkonventionellen Strom- und Spannungswandler als Sekundärgrößen relativ geringe Spannungen von einigen Volt (statt konventionell 100 V und 5 A) abgeben, die obendrein den Primärgrößen zum Teil erheblich nacheilen. Aus Komponenten des PTB-Primärnormals für die elektrische Wechsellleistung wurde eine Messeinrichtung aufgebaut, die es gestattet, sowohl die Übertragungsstrecke als auch das Gesamtsystem zu kalibrieren. Dies geschah in enger Zusammenarbeit mit einem deutschen mittelständischen Unternehmen, dem damit der Zugang zum amerikanischen Markt erleichtert werden soll.



Bild 4: Neues digitales PTB-Normal für die elektrische Wechselleistung



Bild 5: Apparatur zur rückführbaren Kalibrierung von Magnetfeld-Transfersensoren in einem Wellenfeld

Ausbau der Hochfrequenz

Bei der Erschließung des Sub-THz-Gebiets bewegt man sich im Grenzbereich zwischen HF-Technik und Optoelektronik, der für innovative Kommunikationssysteme mit extrem hohen Datenübertragungsraten ein enormes technologisches Potential beinhaltet. Darüber hinaus ist dieser Bereich auch für die Grundlagenforschung auf dem Gebiet der Molekülspektroskopie von sehr großem Interesse. Zur Unterstützung dieser Technik ist eine Sub-THz-Metrologie erforderlich, deren Entwicklung eine wichtige zukünftige Aufgabe der Abteilung ist.

Um den zukünftigen Kalibrierbedarf zu ermitteln, wurde an eine große Zahl von Industrieunternehmen, Forschungseinrichtungen und Universitäten in Deutschland ein Fragebogen versandt, in dem zukünftige Entwicklungsschwerpunkte und Kalibrieranforderungen abgefragt wurden. Dabei zeigte sich, dass Anwendungen bei Frequenzen oberhalb 100 GHz und Mikrostreifenleitungen sowie koplanare Leitungssysteme in Zukunft eine zunehmend wichtigere Rolle spielen werden. Für die PTB geht es dabei vor allen Dingen um die rückführbare On-Wafer-Charakterisierung von Testschaltungen. Der Ausbau soll in enger Zusammenarbeit mit dem *National Institute of Standards and Technology* (NIST) in den USA und den europäischen NMI, insbesondere dem NPL in Großbritannien erfolgen. Dazu wurde bei EUROMET ein Projekt eingerichtet, in dessen Rahmen zukünftige Anforderungen und eine Arbeitsteilung zwischen den NMI diskutiert werden sollen.

In die gleiche Richtung geht ein von der Europäischen Union gefördertes Vorhaben für „ElectroMechanical Microcomponents for Precision Applications“ (EMMA), in dessen Rahmen die PTB gemeinsam mit einer Reihe anderer europäischer Partner in die Entwicklung und Charakterisierung von Mikro-ElektroMechanischen Systemen (MEMS) eingebunden ist. Ziel dieses Vorhabens ist es, MEMS für den Gleich-Wechseltransfer von Gleichspannung bis zu Frequenzen von einigen MHz und die Leistungsmessung bis in den GHz-Bereich zu entwickeln, für die ein hohes Anwendungspotential bei kommerziellen Messgeräten erwartet wird.

Während die PTB routinemäßig Kalibrierungen an Hochfrequenz-Strahlungsmonitoren mit Sensoren für die elektrische Feldstärke durchführt, steht für HF-Magnetfeldsensoren zurzeit noch kein geeignetes Kalibrierfeld zur Verfügung. Im Rahmen einer Machbarkeitsstudie wurde daher ein Verfahren erprobt, mit dem sich HF-Magnetfelder bekannter Stärke rückführbar darstellen lassen (Bild 5). Dies geschieht durch ein stehendes Wellenfeld, das in unterschiedlichen Abständen zu einer leitenden Fläche elektrische und magnetische Feldmaxima aufweist. Durch Messung der elektrischen Feldstärke kann auf die magnetische Feldstärke rückgeschlossen werden.

Sonstiges/Internes

Wesentlicher Bestandteil des Qualitätsmanagementsystems der PTB ist die Prüfmittelüberwachung. Bei der Aufstellung der Prüfmittellisten durch die Fachabteilungen stellte sich heraus, dass in großem Umfang Normale und Messgeräte für die Größen Spannung, Stromstärke und Widerstand zur Kalibrierung anfallen, die sinnvoller Weise im eigenen Hause kalibriert werden sollten. Mit der Einrichtung eines Pilotprojekts zum Aufbau eines internen Kalibrierservice für Prüfmittel wurde hierfür ein erster entscheidender Schritt getan. Neben Mitarbeitern der Abteilung sind auch Vertreter der Referate für Qualitätsmanagement und Technische Ausbildung an dem Projekt beteiligt. Ziel ist es, neben dem Aufbau von rechnergesteuerten Messplätzen und der Erarbeitung eines logistischen Konzepts für den Kalibrierbetrieb auch ein Ausbildungsprofil für eine Zusatzqualifikation „Prüfmittelmanagement“ zu erarbeiten, die den Auszubildenden der PTB in Zukunft angeboten werden soll.

In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

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

Grundlagen der Metrologie

Kalibrierung von Kondensatoren auf der Grundlage des Quanten-Hall-Effekts

Die nationalen metrologischen Institute von Deutschland, Großbritannien, Irland, Portugal und der Schweiz sowie die Technische Universität in Prag haben im Rahmen eines EU-Projekts ein einfach zu handhabendes, modulares Quantennormal zur Kalibrierung von Kondensatoren entwickelt.

Rückführbare Kalibrierung von Magnetfeld-Transfersensoren

Während die PTB routinemäßig Kalibrierungen von Hochfrequenz-Strahlungsmonitoren mit Sensoren für die elektrische Feldstärke durchführt, steht für Magnetfeld-Sensoren noch kein geeignetes Kalibrierfeld zur Verfügung. Im Rahmen einer Machbarkeitsstudie konnte gezeigt werden, dass in einem stehenden Wellenfeld ein ausreichend homogenes HF-Magnetfeld erzeugt werden kann.

Spannungsvergleiche programmierbarer Josephson-Schaltungen

Erstmalig ist in der PTB ein direkter Vergleich von Serienschaltungen für programmierbare Josephson-Spannungsnormale vorgenommen worden. Dazu wurde eine Serienschaltung in der Mitte geteilt und die bei Einstrahlung einer Mikrowelle erzeugten Spannungen gegeneinandergeschaltet. Eventuell vorhandene Spannungsdifferenzen wurden mit einem SQUID detektiert.

Synthese von Wechselspannungen mit programmierbaren Josephson-Schaltungen

Die Möglichkeiten der Synthese von Wechselspannungen mit binär unterteilten Reihenschaltungen aus SINIS-Josephson-Kontakten wurden in ersten vielversprechenden Untersuchungen erprobt. Sie wurden im Rahmen einer Kooperation mit dem National Physical Laboratory, UK, durchgeführt.

RSFQ-Schaltungen für hochintegrierte supraleitende Schaltungsanwendungen

RSFQ-Logikschaltkreise zeichnen sich durch hohe Taktfrequenzen bis in den Sub-THz-Bereich bei gleichzeitig extrem niedriger Leis-

tungsdissipation ($< 1 \mu\text{W}/\text{Gatter}$) aus. In RSFQ-Logik aufgebaute Frequenzteiler sollen dazu dienen, den Frequenzvergleich zwischen der in Josephson-Serienschaltungen eingestrahlten Mikrowelle und einer Normalfrequenz mit herkömmlichen und damit entsprechend preisgünstigen Phasenregelkreisen durchführen zu können.

Erzeugung kleinster Strukturen mittels additiver Lithographie

Ein vorhandenes Elektronenstrahl-Lithographie-System wurde um einen Zusatz erweitert, der es gestattet, Sub- μm -Strukturen direkt aus der Gasphase auf einem Substrat abzuscheiden. Durch die Kombination dieser Abscheidvorrichtung mit einem Elektronenstrahl-Photolithographie-System können Strukturen im Sub- μm -Bereich direkt erzeugt und positioniert werden.

Verbesserte optische und elektrische Eigenschaften von Halbleitern durch verbesserte Grenzflächen

Halbleiter-Schichtkristalle bilden die Grundlage moderner Bauelemente der Optoelektronik, spielen aber auch im Bereich der elektrischen Einheiten eine zunehmend wichtige Rolle. Ihre Eignung für den jeweiligen Einsatzzweck wird maßgeblich von der Qualität der inneren Grenzflächen bestimmt, die wiederum vom Herstellungsverfahren abhängt. Diese Einflüsse wurden systematisch untersucht mit dem Ergebnis, dass die Rauigkeit dieser Grenzflächen durch Optimierung der Prozessparameter deutlich verringert werden konnte.

Dynamik von Elektronen in Halbleiter-Quantenpunkten

In Halbleiterstrukturen eingebettete Quantenpunkte können als künstliche Atome betrachtet werden. Sie spielen bei der Messung der elektrischen Stromstärke oder des Photonenflusses eine zunehmend wichtigere Rolle. Bevor solche Anwendungen möglich werden, ist es erforderlich, das Verhalten von Elektronen in den angeregten Zuständen des Quantenpunkts zu verstehen.

Resonantes Einzel-Elektronen-Tunneln durch „künstliche Moleküle“

Erstmals ist das resonante Tunneln einzelner Elektronen durch zwei vertikal gekoppelte Quantenpunkte beobachtet worden. Die Strukturen wurden durch selbstorganisiertes Wachstum hergestellt. Ihre Kennlinien zeigen ausgeprägte Stromspitzen, die dem sequentiellen Tunneln durch die Grundzustände der beiden Quantenpunkte zugeordnet werden können.

Bewertung der Qualität von Proben für den Quanten-Hall-Effekt

Der Quanten-Hall-Effekt bildet die Grundlage für die präzise Reproduzierung der Einheit des elektrischen Widerstands. Von besonderem Interesse ist dabei die Qualität und die Breite der sich ausbildenden Plateaus. Die Abhängigkeit der Plateaubreite von der Lebensdauer der elektronischen Zustände wurde eingehend untersucht.

Einzelelektronentransistoren auf Niob-Basis

Supraleitende Schaltungen mit Tunnelkontakten ermöglichen die Manipulation einzelner Cooperpaare und können zur Realisierung von Stromstärke-Normalen oder Quantenbits verwendet werden. Die Verwendung von Niob mit einer um eine Größenordnung höheren Energielücke gegenüber Aluminium bietet den Vorteil, dass das störende Quasiteilchentunneln verringert und die Josephson-Kopplungsenergie erhöht wird. Diese ist für viele Anwendungen von großer Bedeutung.

Metrologie für die Wirtschaft

Elektronische Kapazitäts- und Verlustfaktor-Messbrücken einfacher und gleichzeitig genauer kalibrieren

Ein auf digitaler Signalsynthese und Abtastung basierendes Verfahren erlaubt die Kalibrierung von Kapazitäts- und Verlustfaktor-Messbrücken ohne den Einsatz von Hochspannungsquellen und -kondensatoren mit Unsicherheiten kleiner als $1 \cdot 10^{-6}$ bzw. $1 \mu\text{rad}$.

Ermittlung der Fehlerterme vektorieller Netzwerkanalysatoren (VNA)

Das in der Industrie häufig eingesetzte 12-Term-TMSO-Verfahren kann unter Umständen erhebliche Abweichungen aufweisen, wenn die in den VNA-Kalibriersätzen mitgelieferten Kalibriernormale als ideale Ab-

schlüsse angesehen werden. Dies konnte in einer umfangreichen theoretischen und experimentellen Studie gezeigt werden.

Optimierung von HF-Reflexionsnormalen mit Hilfe von genetischen Algorithmen

Es wurde ein koaxiales HF-Reflexionsnormal zur Kalibrierung vektorieller Netzwerkanalysatoren mit zwischen DC und 250 MHz berechenbarem Reflexionsfaktor entwickelt. Der DC-Widerstandswert wurde aus rückgeführten Messungen des Reflexionsfaktors bis 10 GHz mit Hilfe von genetischen Algorithmen ermittelt. Er stimmt gut mit dem bei DC gemessenen Wert überein.

Kalibrierung von Feldspulen als Normale für die magnetische Flussdichte

Aus dem axialen Feldverlauf einer Magnetfeldspule kann der Wert der Flussdichte in ihrem geometrischen Zentrum aus den in SI-Einheiten gemessenen Werten für die Stromstärke und den Verschiebeweg bestimmt werden. Dazu wurde eine Messanlage entwickelt, mit der der Sensor eines Saturationskern-Magnetometers in der Achse der zu kalibrierenden Spule verfahren und seine jeweilige Position mit hoher Präzision erfasst werden kann.

Kernresonanz-Magnetometer misst eine Flussdichte von 150 mT mit einer Auflösung von 10 nT

Kernresonanz-Magnetometer nutzen den gyromagnetischen Effekt und erlauben mittels einer Frequenzmessung eine sehr genaue Messung magnetischer Felder. Es wurde eine Anordnung konzipiert, die als einzige Hardware-Komponente einen synchronisierbaren Marginal-Oszillator enthält, während alle anderen Funktionen zur Steuerung des Magnetometers und der Auswertung der Signale rechnergestützt ablaufen.

Wechselspannungsmodul für Gleichspannungs-Digitalvoltmeter

Herkömmliche Digitalvoltmeter besitzen bei Wechselspannung deutlich höhere Messunsicherheiten als bei Gleichspannung. Mit dem neu entwickelten Wechselspannungsmodul lassen sich Wechselspannungen im Frequenzbereich von 10 Hz bis 1 MHz mit Unsicherheiten von $2 \cdot 10^{-5}$ bis $5 \cdot 10^{-5}$ auf eine entsprechende Gleichspannung zurückführen und damit genau messen.

Schnelle AC-DC-Transfermessungen mit digitalem Abtastverfahren

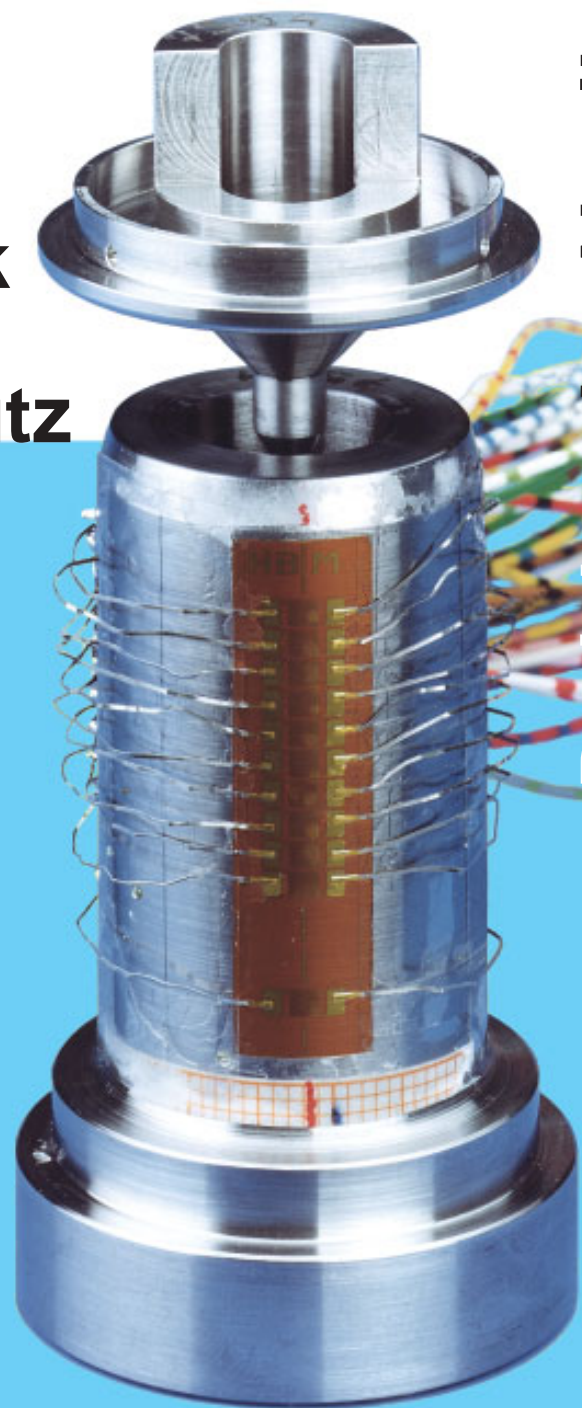
Der AC-DC-Transfer mit thermischen Verfahren ist äußerst genau, aber zeitaufwendig. Für Frequenzen unterhalb von 200 Hz kann der AC-DC-Transfer auch mit einem digitalen Abtastverfahren mit deutlich geringerem Zeitaufwand bei vergleichbarer Genauigkeit durchgeführt werden. Vergleichsmessungen zwischen Thermokonverter und Abtastverfahren ergaben eine Übereinstimmung auf $0,5 \cdot 10^{-6}$.

Metrologie für die Gesellschaft

Unkonventionelle Messwandler auf unkonventionelle Weise kalibriert

Neben ihrer Verwendung zu Schutzzwecken werden elektronische, unkonventionelle Messwandler auch zunehmend für die Messwertbildung eingesetzt. Mit den herkömmlichen Messverfahren können diese Wandler nicht kalibriert werden, weil ihre Ausgangssignale in Form kleiner Spannungen bereitgestellt werden, die häufig gegenüber den Eingangssignalen zeitlich verzögert sind. Ein neues auf digitaler Signalabtastung basierendes Verfahren wurde gezielt für die Kalibrierung solcher Wandler entwickelt.

Thermodynamik und Explosionsschutz



Berichte der Abteilungen

Abteilung

3

Thermodynamik Explosions

Forschung und Entwicklung für die Metrologie in der Chemie

Forschung und Entwicklung für die Metrologie in der Chemie ist unverzichtbar, um angesichts schneller technologischer Veränderungen in der Chemie metrologische Kompetenz auch in Zukunft bereitstellen zu können. Eine wichtige Rolle spielen dabei abteilungsübergreifende Kooperationen innerhalb der PTB und Kooperationen mit externen Einrichtungen der Forschung, der Industrie und mit Fachinstituten. So werden im Fachbereich *Chemische Physik* zzt. etwa 20 % des Budgets durch eingeworbene Drittmittel abgedeckt (BMBF, BMWA, EU, Volkswagenstiftung).

Im Vordergrund des Interesses stehen solche Themenfelder, die unmittelbar der Etablierung und Erweiterung metrologischer Rückführungsstrukturen dienen (Primär- und Transfornormale), andererseits werden aber auch Projekte bearbeitet, die neue Messverfahren zum Ziel haben. Hier sollen durch den Einsatz neuer Technologien genauere Messverfahren entwickelt werden oder gänzlich neue Messverfahren für neue Technologiefelder bereitgestellt werden. Dies gilt z. B. für die Biotechnologie und Nanotechnologie.

Durch die Zusammenarbeit mit Industrie und Forschungseinrichtungen im Rahmen von Vorhaben können besonders kundennah Kompetenz und Kenntnis über zukünftige Arbeitsfelder gewonnen werden. Es ist darüber hinaus typisch für viele dieser Forschungsvorhaben, die in verschiedenen Bereichen der PTB vorhandene messtechnische Kompetenz durch abteilungsüber-

greifende Zusammenarbeit für die chemisch-analytische Messtechnik zusammenzuführen und zu nutzen (Synergieeffekte). Beispielhaft sollen im Folgenden Forschungsthemen aus allen Arbeitsgebieten der Metrologie in der Chemie vorgestellt werden. Dieser spezielle Bereich der Metrologie befindet sich sowohl in der PTB als auch weltweit noch im Aufbau. Rückführungssysteme für einige Messgrößen sind etabliert, an weiteren wird gearbeitet.

Elektrolytische Leitfähigkeitsmessungen als Kriterium für die Wasserqualität

Wasser als Rohstoff unterliegt bei vielen Anwendungen hohen Qualitätsanforderungen. Keine pharmazeutische Produktion kommt ohne Reinstwasser aus. In der Halbleiterherstellung wird Reinstwasser zu zahlreichen Spülvorgängen verwendet. Über eine kontinuierliche Leitfähigkeitsmessung kann die Wasserqualität schnell und sicher kontrolliert werden. Der Leitwert des Messmediums ist von der Anzahl, der Ladung und der Beweglichkeit der Ionen abhängig. Ein Leitfähigkeitssensor erfasst die Summe aller in der Lösung befindlichen Ionen. Die Anforderungen an die Qualität des für die Herstellung von Arzneimitteln und Injektionslösungen verwendeten Wassers sind im Wesentlichen im amerikanischen Arzneibuch (United States Pharmacopeia, USP 25-NF 20) festgelegt. Die Wasserqualität ist danach über die Leitfähigkeit zu messen, die ihrerseits auf nationale Standards rückgeführt werden muss. Um die Anforderungen zu erfüllen, darf die Leitfähigkeit einen Wert von $1,3 \mu\text{S}/\text{cm}$ bei 25°C nicht überschreiten. International anerkannte, primäre Messverfahren und Referenzmaterialien zur Kalibrierung von Leitfähigkeitsmessrichtungen gibt es für diesen Messbereich aber noch nicht.

Titelbild
Deformationsmessungen an einem 1-GPa-Kolben-Zylinder-Druckmesssystem mit Hilfe von Dehnungsmessstreifen

amik und schutz

In einem gemeinsamen Vorhaben wollen die PTB (3.202, 2.1, 5.33), weitere NMI (IEN/Italien, LNE/Frankreich) und einige Partner aus der Industrie die Voraussetzungen für die Rückführung kleiner Leitfähigkeiten von $0,055 \mu\text{S cm}^{-1}$ bis $5 \mu\text{S cm}^{-1}$ schaffen. Innerhalb der PTB soll die Aufgabe in Kooperation mit den Abteilungen 2 und 5 bearbeitet werden und damit die erfolgreiche Zusammenarbeit im Projekt 3.002 „Elektrolytische Leitfähigkeit“ fortgesetzt werden. Inzwischen konnte

der Messbereich der in der PTB entwickelten primären Messapparatur (Bild) soweit erweitert werden, dass noch Werte von $1 \mu\text{S cm}^{-1}$ zuverlässig gemessen werden können. Bei der Konstruktion der Messzelle wurde dazu Edelstahl anstelle von Platin als traditionellem Elektrodenmaterial eingesetzt. Dieses Material wird nicht vom Reinstwasser angegriffen. Weiter war es wegen der hohen Impedanz des Messmediums Reinstwasser notwendig, den Leitwert auch bei niedrigen

Frequenzen unter 100 Hz zu bestimmen, um den Einfluss der Zellkapazität zu minimieren. Durch Vergleichsmessungen mit Referenzlösungen von $5 \mu\text{S cm}^{-1}$ wurde sichergestellt, dass die Ergebnisse der modifizierten Messanordnung mit denen der primären, international validierten Messprozedur im Rahmen der geforderten Unsicherheit von $< 1 \%$ übereinstimmt.

Darüber hinaus wurde die Voraussetzung geschaffen, die bestehende primäre Basis zukünftig auch im kontinuierlichen Betrieb zu nutzen. Dazu wurde das existierende System um eine Durchflussmesszelle mit bekannter Geometrie erweitert.

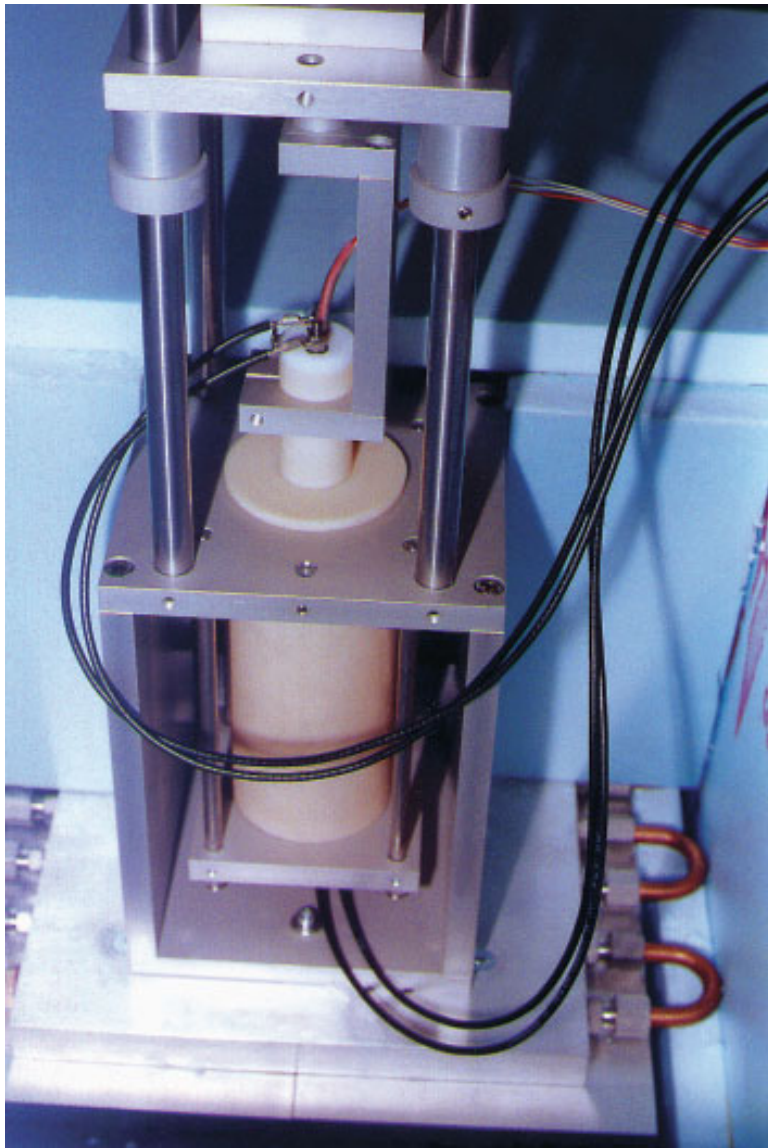


Bild 1: Primäre Leitfähigkeitsmesszelle der PTB

Rückführung in der Elementanalytik

In der chemischen Elementanalytik ist die Verwendung kommerziell erhältlicher Kalibrierlösungen mit einer Elementkonzentration von 1 g/l sehr verbreitet. Obwohl diese Lösungen von zentraler Bedeutung für die Zuverlässigkeit von Messungen in der gesamten Elementanalytik sind, fehlte hierfür bisher eine metrologische Rückführungsbasis. Im Rahmen eines vom BMWA unterstützten, gemeinsamen Projekts wollen deshalb BAM und PTB ein nationales Bezugssystem für die Elementanalytik aufbauen und damit Herstellern von kommerziellen Elementkalibrierlösungen die Möglichkeit zur metrologischen Rückführung ihrer Produkte bieten. Es handelt sich hierbei um ein sehr umfangreiches und anspruchsvolles Projekt, da insgesamt 68 Elemente als analytisch bedeutsam eingestuft wurden.

Die Rückführungsbasis bilden Reinstoffe (Reinheit etwa 99,99 %), von denen die Gehalte aller Verunreinigungen mit höchster Messgenauigkeit bestimmt wurden (BAM). Diese Materialien stellen die nationalen Normale für die Elementanalytik dar und zählen mit einer relativen Unsicherheit der Reinheit von $U_{\text{rel}} \leq 0,01 \%$ zu den am genauesten charakterisierten Materialien weltweit. Hieraus werden gravimetrisch primäre Elementlösungen hergestellt, deren Elementkonzentrationen eine relative Unsicherheit von etwa 0,01 % aufweisen. Das Weitergabekonzept sieht vor,



dass der Anschluss der Hersteller der Elementkalibrierlösungen mit Hilfe von Transferlösungen und durch Vergleichsmessungen im Rahmen einer Akkreditierung erfolgt. Die Transferlösungen werden von den Primärlösungen abgeleitet und dienen der Kalibrierung der Zertifizierungsanalytik beim Hersteller, für die eine relative Messunsicherheit von etwa 0,1 % gefordert wird.

Die Grundlage für die Weitergabe bildet in der PTB ein System primärer Elementlösungen, deren Konsistenz durch Vergleichsmessungen dieser Lösungen untereinander und mit neu angesetzten Primärlösungen jederzeit sichergestellt werden kann. Für diese Messungen sowie zum Anschluss der Transferlösungen und für Vergleichsmessungen im Rahmen von Laborakkreditierungen wurde ein Präzisionsmessverfahren mit Hilfe der ICP-OES entwickelt (Bild 2). Es beruht auf dem Vergleich der Strahlungsemissionen des zu messenden Elements von zwei Lösungen an bis zu zehn Spektrallinien, die sich in Vorversuchen als frei von Interferenzen mit Spektrallinien anderer Elemente und als besonders stabil hinsichtlich des Signal/Rausch-Verhältnisses erwiesen haben. Die Strahlung wird simultan im gesamten Spektralbereich zwischen 150 nm und 750 nm mit CC-Detektoren registriert. Yttrium-Lösungen dienen als interne Referenz. Die beiden Lösungen, von denen eine zur Kalibrierung dient, werden über eine Zeitdauer von bis zu 4 h ständig abwechselnd gemessen (bracketing). Dadurch können Driften erkannt und korrigiert werden. Dem Gesamtergebnis einer Messung liegen etwa 1000 Einzelmesswerte zugrunde. Das Verfahren wurde bisher auf die Elemente Fe, Cu, Pb und Na angewendet, relative Messunsicherheiten von etwa 0,05 % wurden erzielt.

Dieses Präzisionsmessverfahren ist eine der genauesten Möglichkeiten, die Konzentrationen von Lösungen zu überwachen. Absolutmessverfahren, mit denen unabhängig von einer Kalibrierbasis aus primären Lösungen die Elementkonzentrationen bestimmt werden können, wie beispielsweise mit der Coulometrie, liefern zurzeit noch nicht die erforderliche Messgenauigkeit.

Bild 2: Optisches Immissionspektrometer mit induktiv gekoppeltem Plasma zur Präzisionsmessung von Elementlösungen

Feuchtemessungen im Ultraspurenbereich für die Halbleiterindustrie

Für die Reinstgas- und Halbleiterindustrie ist die Spurenfeuchteanalytik zur Bestimmung von Restwasserdampfgehalten als Verunreinigung von großer technologischer und wirtschaftlicher Bedeutung. Während vor etwa 15 Jahren Wasserdampfgehalte von 1 µl/l noch akzeptiert wurden, stehen heute, bedingt durch die zunehmende Integrationsdichte der Halbleiterbauelemente, die Forderungen bei 0,01 µl/l.

Zur Analyse solch kleiner Feuchtekonzentrationen wurde in der PTB in den letzten Jahren ein neues Primärnormal auf der Basis der Coulometrie aufgebaut, das Referenzgase mit Wasserdampfgehalten im Spurenfeuchtebereich von 500 µl/l bis 5 nl/l Volumenanteil erzeugen kann. Der Spurenfeuchte-Generator der PTB nutzt das coulometrische Prinzip, indem er mittels Wasser-Elektrolyse gemäß Faradays Gesetz definierte Mengen an Wasserstoff und Sauerstoff erzeugt und diese dann an einem Pd/Pt-Katalysator wieder zu Wasser rekombiniert. Die Coulometrie ist eine der wichtigsten Primärmethoden (fundamentale Methode), da sie die direkte Rückführung auf die SI-Einheiten Ampere, Sekunde und Mol ermöglicht. Eine wichtige Voraussetzung dafür ist allerdings, dass eine vollständige Stromausbeute für die betrachtete Reaktion $2\text{H}_2\text{O} = 2\text{H}_2 + \text{O}_2$ gegeben ist. Für höhere Stromstärken ist dies durch eine Vielzahl von Untersuchungen (unter technischen Aspekten im Rahmen der Wasserstofftechnologien) abgesichert worden. Für die Erzeugung von Referenzgasen mit Spurenfeuchtegehalten von 1000 nl/l bis 10 nl/l werden Stromstärken im Bereich 1 µA bis 100 µA benötigt, worüber es bisher nur wenige und teilweise auch widersprüchliche Untersuchungsergebnisse gibt („faradaic“- und „non-faradaic“-Verhalten).

Im vergangenen Jahr konnte in der PTB mit einer Messunsicherheit von etwa 1 % nachgewiesen werden, dass in einer speziellen Elektrolysezelle hinab bis zu einer Stromstärke von etwa 20 µA die Wasserelektrolyse quantitativ abläuft. Damit konnte der coulometrische Spurenfeuchte-Generator bis zu einer unteren Grenze des Arbeitsbereichs von 100 nl/l Volumenanteil Wasserdampf validiert werden.

Die theoretisch mögliche Grenze dieses Generators liegt im Bereich von 1 nl/l bis 10 nl/l und ist hauptsächlich bestimmt durch die Stromstärke, die mindestens notwendig ist, um eine Zellspannung zu erreichen, die oberhalb der Zersetzungsspannung des Wassers liegt. Diese Spannung ist keine feste Größe und ist insbesondere von der Konstruktion der Elektrolysezelle abhängig. Zukünftiges Entwicklungsziel ist deshalb die Realisierung einer Elektrolysezelle, mit der bei Stromstärken um 1 µA noch die Zersetzungsspannung des Wassers erreicht wird, so dass Referenzgase mit Wasserdampfgehalten um 10 nl/l generiert werden können.

Trotz dieser deutlichen Weiterentwicklungen in der Gasfeuchte-Messtechnik herrscht im Spurenfeuchte-Bereich immer noch ein Mangel an zuverlässiger Messtechnik mit hoher Genauigkeit, Empfindlichkeit und Stabilität, die u. a. auch als TransfERNormal im Rahmen von Key Comparisons geeignet ist (zurzeit sind das noch Tauspiegel-Hygrometer). Eine solche Messtechnik könnte in Zukunft die Diodenlaser-Spektroskopie sein. Es sind deshalb auch in der PTB Projekte zur Entwicklung solcher Gasanalyse-Geräte angelauten, an denen sowohl das Sachgebiet Gasfeuchte (3.23) als auch die anorganische Analytik (3.22) beteiligt sind.

Bestimmung klinisch-diagnostischer Marker mittels Massenspektrometrie

Die Charakterisierung des Gesundheitszustands von Patienten in der ärztlichen Praxis beruht unter anderem auf der Bestimmung ausgewählter Substanzen in Körperflüssigkeiten wie Blut oder Urin. Routinemäßig werden die Konzentrationen von am Stoffwechsel beteiligten Substanzen wie Glucose, Cholesterin, Kreatinin, Harnsäure oder Harnstoff gemessen. Andere dienen der Bestätigung/Eingrenzung von Befunden oder zur Kontrolle des Therapieverlaufs und werden in Abhängigkeit vom jeweiligen medizinischen Problem benötigt. Zur Qualitätskontrolle der laboratoriumsmedizinischen Routinemessung werden Materialien eingesetzt, die mit größtmöglicher Genauigkeit charakterisiert sein müssen. Hierzu eignet sich aufgrund des Prinzips insbesondere die massenspektrometrische Isotopenverdünnungsmethode (IDMS). Dabei werden Test- und Referenzproben mit unterschiedlicher Isotopenzu-

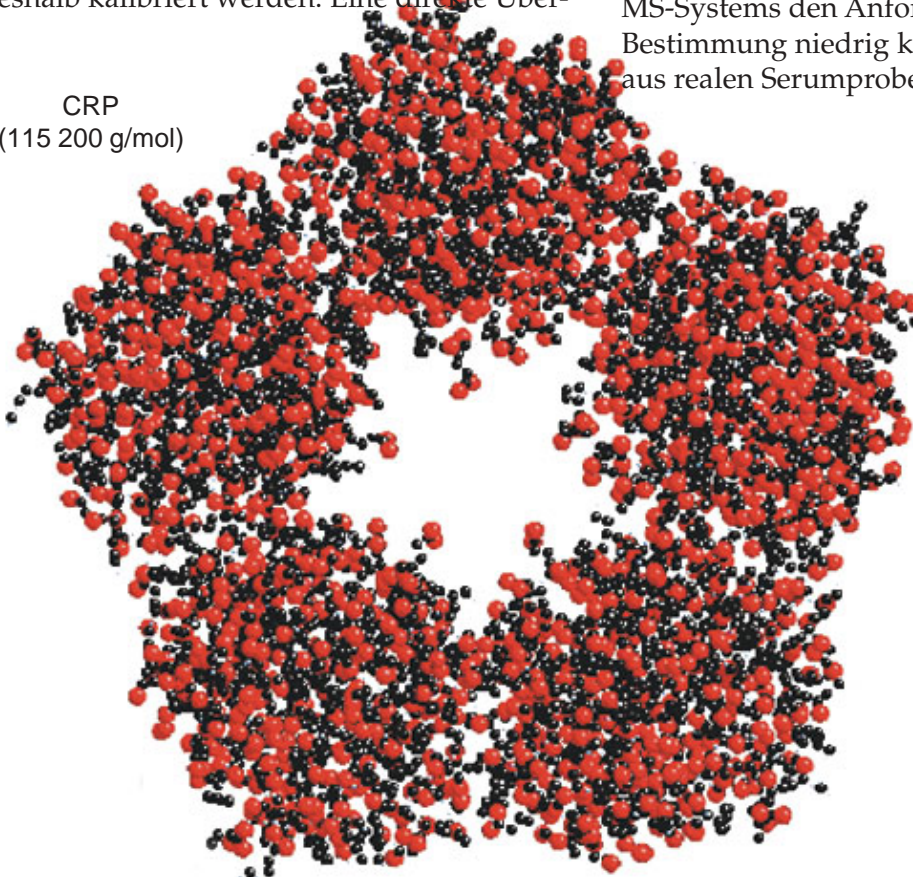
sammensetzung im selben Experiment messtechnisch getrennt und quantitativ verglichen.

Entsprechende Verfahren sind für viele der niedermolekularen Verbindungen seit längerer Zeit bekannt und wurden in der PTB im Zusammenhang mit dem Aufbau einer Rückführungs-Infrastruktur installiert. Typischerweise erreichbare Messgenauigkeiten sind etwa 1 % für höher konzentrierte Substanzen wie Cholesterin, Glucose und Kreatinin und 3 % für Spurenstoffe wie etwa das Steroidhormon Progesteron.

Besondere Bedeutung gewinnt in letzter Zeit die Entwicklung von Verfahren zur genauen Quantifizierung von Proteinen, die als diagnostische Marker gelten (Bild 3). Wichtige Beispiele sind Troponin I (Frühanzeige Myocard-Infarkt), C-reaktives Protein (CRP, Entzündungen im Allgemeinen, aber auch Frühwarnung Schlaganfall), Glycohäoglobin (GHP, Maß für Langzeit-Glucosespiegel), Choriogonadotropin (hCG, Schwangerschaftstest). In der Routinebestimmung angewandte Messverfahren beruhen meist auf der Erkennung des jeweiligen Proteins durch speziell entwickelte Antikörper. In vielen Fällen sind diese Verfahren jedoch nicht ausreichend selektiv und präzise und müssen deshalb kalibriert werden. Eine direkte Über-

tragung der für kleine Moleküle erfolgreichen Isotopenverdünnungsmethodik auf organische Makromoleküle, wie Proteine, ist aber nicht ohne weiteres möglich. Der durch Isotopenaustausch in einigen wenigen Positionen des Moleküls erzeugte Massenunterschied zwischen Test- und Referenzmaterial ist für eine Trennung der Signale in diesem Fall nicht mehr ausreichend. In einem neueren Lösungsansatz wird die erforderliche Unterscheidbarkeit der Probensignale durch Anbringung von niedermolekularen so genannten „Tags“ am Protein erzeugt. Diese existieren in jeweils einer schweren und einer leichten Version: Die schwere Version unterscheidet sich von der leichten beispielsweise durch Austausch einiger Wasserstoffatome gegen Deuterium (denkbar wäre auch ^{12}C gegen ^{13}C). Die PTB engagiert sich in Zusammenarbeit mit LGC (UK) und NIST (USA) in einer methodischen Studie, bei der verschiedene Möglichkeiten der Isotopenmarkierung von Proteinen mit unterschiedlichen massenspektrometrischen Gerätesystemen getestet werden. Erste Ergebnisse mit Rinderserum-Albumin als Modellsubstanz in einfacher wässriger Lösung sind erfolgversprechend. Weitere Versuche sollen klären, wieweit Massenauflösung und Empfindlichkeit des in der PTB vorhandenen LC-(Single)-Quadrupol-MS-Systems den Anforderungen für die Bestimmung niedrig konzentrierter Proteine aus realen Serumproben genügen (Bild 4).

CRP
(115 200 g/mol)



Progesteron
(314 g/mol)

Bild 3: Rückführung diagnostischer Marker in der organischen Analytik: Vom niedermolekularen Progesteron (Steroidhormon) bis zu Makromolekülen wie C-reaktivem Protein (CRP)

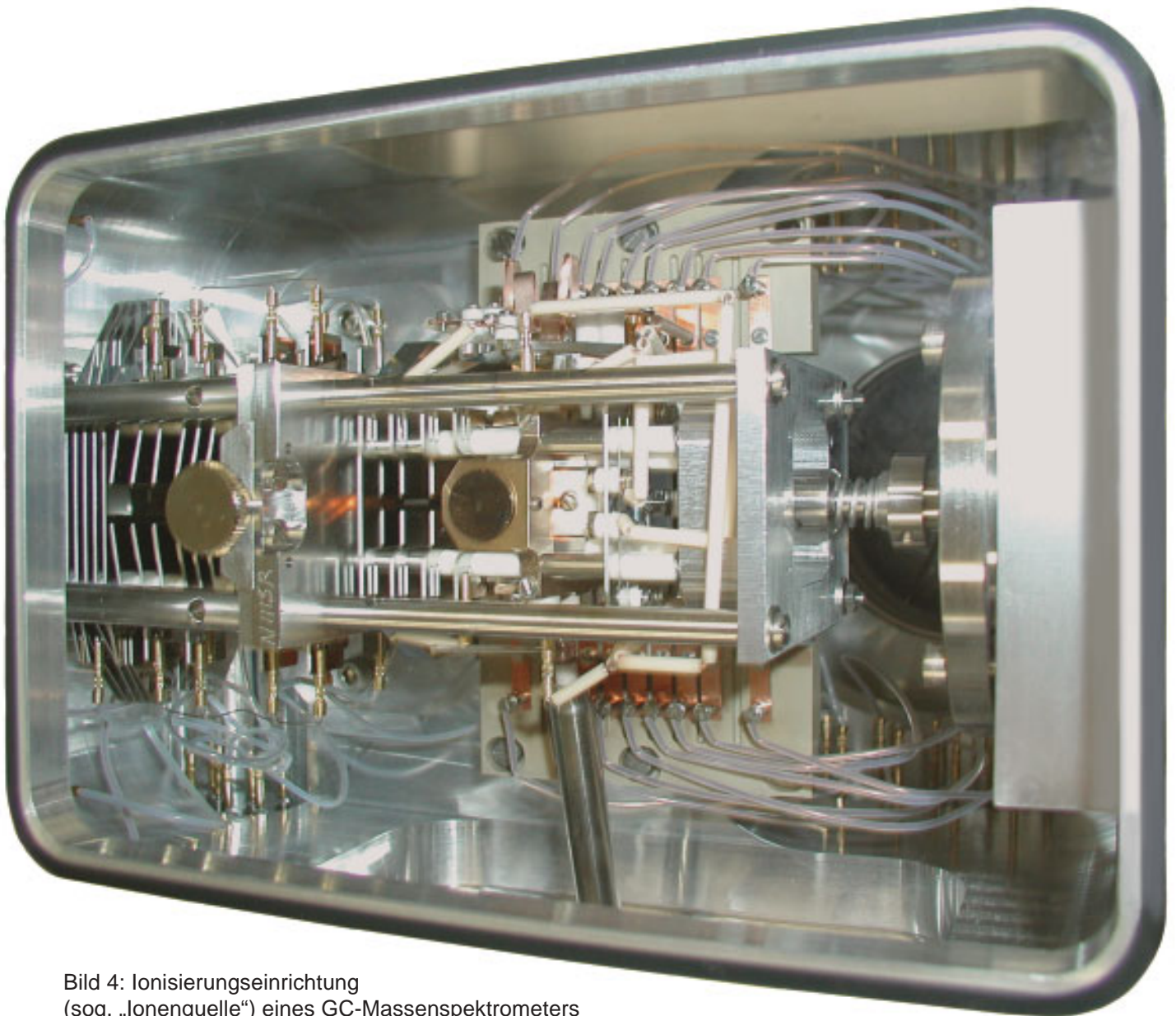


Bild 4: Ionisierungseinrichtung (sog. „Ionenquelle“) eines GC-Massenspektrometers

Neue Messverfahren für die ortsauflöste Analytik

Im Zuge der fortschreitenden Miniaturisierung besteht in vielen Hochtechnologiebereichen ein wachsender Bedarf an ortsauflösten analytischen Messungen bis in die Größenordnung von Quantenstrukturen und Molekülen. Die PTB (5.201, 3.22, 2.41) arbeitet im „Kompetenzzentrum Nanoanalytik“ des BMBF in einem Verbundprojekt mit sieben Partnern aus Forschung und Industrie in diesem Feld. Es wird ein kombiniertes System zur Materialanalytik auf der Basis der optischen Fernfeld- und Nahfeldmikroskopie bei tiefen Temperaturen entwickelt. Damit sollen Oberflächen im Temperaturbereich zwischen Raumtemperatur und Helium-Temperaturen abbildend (rasternd) dargestellt und analysiert werden.

Probe und Mikroskop befinden sich in einer Hochvakuumkammer. Sie sind thermisch und mechanisch getrennt und können mit zwei unabhängigen Positioniersystemen bewegt werden. Das Mikroskop wird von einem geregelten Piezo-Tisch ($100 \times 100 \times 20 \mu\text{m}^3$) über die Probe gescannt. Gleichzeitig können der Kühlfinger und die darauf befestigte Probe mit Schrittmotoren in drei Richtungen ($5 \times 5 \times 5 \text{ mm}^3$) justiert werden. Das Mikroskop wird mittels Lichtwellenleiter an eine externe Strahlungsquelle und ein Spektrometer angeschlossen (Bild 5).

Das neu entwickelte System wurde im vergangenen Jahr erstmals zur Charakterisierung des Lumineszenzverhaltens von Quantenpunkten (QDs) eingesetzt. Dazu wurden Proben mit geringer Punktdichte hergestellt

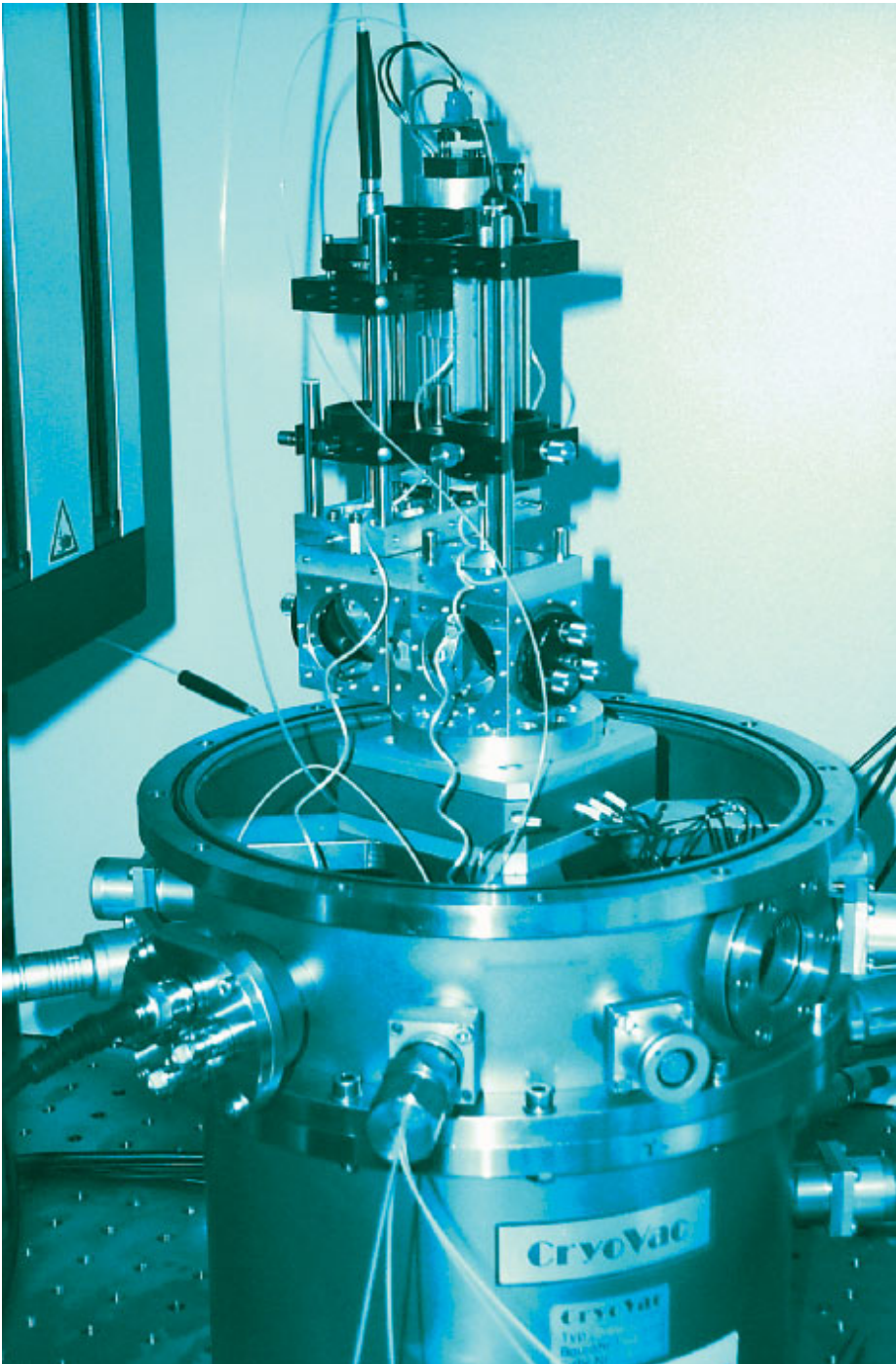


Bild 5: Tieftemperatur-Mikroskopsystem bei geöffneter Kryostatkammer
Im Vordergrund sind Lichtleiterdurchführungen erkennbar.

(InAs QDs auf GaAs-Substraten). Das Besondere dieser Proben ist die Variation der Dichte der QDs auf dem Wafer. Es konnten Punktdichten von weniger als $1/\mu\text{m}^2$ nachgewiesen werden, wobei zur Untersuchung ein SNOM-Kopf im Rasterkraftmodus eingesetzt wurde. Die Quantenpunkte wurden im Tieftemperaturbereich ($T = 30\text{ K}$) mit Mikro-photolumineszenz (PL)-Messungen optisch-spektroskopisch untersucht. In Bereichen mit vereinzelt QDs erfolgte die Anregung mit einem He-Ne-Laser. Bereiche mit nur wenigen Quantenpunkten sind durch eine schmale Bandbreite der Emissionen (bis 4 meV) charakterisiert. Messungen in Regionen mit unterschiedlicher Punktdichte zeigen eine Verschiebung der PL-Emission in den höherenergetischen Bereich bei geringeren Punktdichten an.

In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

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

Grundlagen der Metrologie

Bestimmung des Druckverformungskoeffizienten eines 1-GPa-Kolben-Zylinder-Druckmesssystems

Eine experimentelle Methode zur Bestimmung des Druckverformungskoeffizienten von Kolbenmanometern wurde weiterentwickelt und für das PTB-1-GPa-Drucknormal angewendet, was eine genauere Realisierung der Druckskala erlaubt.

Metrologie für die Wirtschaft

Ein neues Messverfahren für die Temperaturleitfähigkeit

Zur schnellen Messung der Temperaturleitfähigkeit von Feststoffen, Fluiden und Schüttgütern wurde ein neues instationäres Verfahren entwickelt und zum Patent angemeldet.

Direkt anzeigendes Messgerät für die Wärmeleitfähigkeit

Ein erstmals direkt anzeigendes Messgerät für die Wärmeleitfähigkeit, das nach dem zum Patent angemeldeten quasistationären Verfahren arbeitet, wurde aufgebaut.

Nicht-Newtonsche Referenzflüssigkeiten

Für die Überprüfung von Rotationsviskosimetern und zur Durchführung von Vergleichsmessungen wurden zwei nicht-Newtonsche Referenzflüssigkeiten zertifiziert.

Erweiterung der primären pH-Messapparatur für den Temperaturbereich von 50 °C bis 80 °C

Der pH-Wert in diesem Temperaturbereich ist eine wichtige Kenngröße zur Überwachung der Produktion von Nahrungs- und Arzneimitteln.

Entwicklungen auf dem Gebiet der mittleren bis hohen Gasfeuchte

Erweiterung des Messbereichs in Richtung höherer Gasfeuchte: wichtiger Klimaprüfpunkt 85/85 jetzt rückführbar.

Explosionsgefahr in nichtentgasten Benzintankschiffen

Für das Bundesverkehrsministerium sowie für Verkehrsbehörden der Schweiz und der Niederlande untersuchte die PTB Explosionsgefahren in leerfahrenden Benzintankschiffen, deren Tanks nicht entgast wurden.

Anwendung einer neuen Bestimmungsmethode zur Zündwirksamkeit elektrostatischer Entladungen

Eine neue Bestimmungsmethode zur Zündwirksamkeit elektrostatischer Entladungen wurde auf zahlreiche Geräte und Werkstoffe mit elektrostatischen Zündgefahren angewendet und in Normungsvorschläge für die Prüfung von elektrostatischen Handsprüheinrichtungen, IBC, FIBC und Textilien für Schutzbekleidung eingebracht.

Der Einfluss von hochporösen Werkstoffen auf den Zünddurchschlag

Im Rahmen eines ProInno-Projekts werden in Zusammenarbeit mit einem Industriepartner Maßnahmen untersucht, die das Risiko eines Zünddurchschlags während einer Bauartprüfung mindern oder sogar die Zünddurchschlagsicherheit eines druckfesten Gehäuses garantieren sollen.

Die Berechnung von Explosionsgrenzen mit detaillierter Reaktionskinetik

Ein Modell zur numerischen Bestimmung der Explosionsgrenzen verschiedener Brennstoff/Luft/Inertgas-Gemische wurde entwickelt und durch den Vergleich der berechneten Explosionsgrenzen mit experimentell nach DIN 51 649 bestimmten Werten validiert.

Experimentelle Untersuchung der Zündung von H₂/Luft-Gemischen durch heiße Freistrahlen

Mit Hilfe eines neu errichteten Messplatzes ist es möglich, simultan verschiedene laserspektroskopische Messtechniken zur Untersuchung der Zündprozesse bei einem Zünddurchschlag zu verwenden.

Metrologie für die Gesellschaft

Messaufbau zur Bestimmung kleiner Gasmassen für den Betrieb eines neuen Referenz-Gaskalorimeters

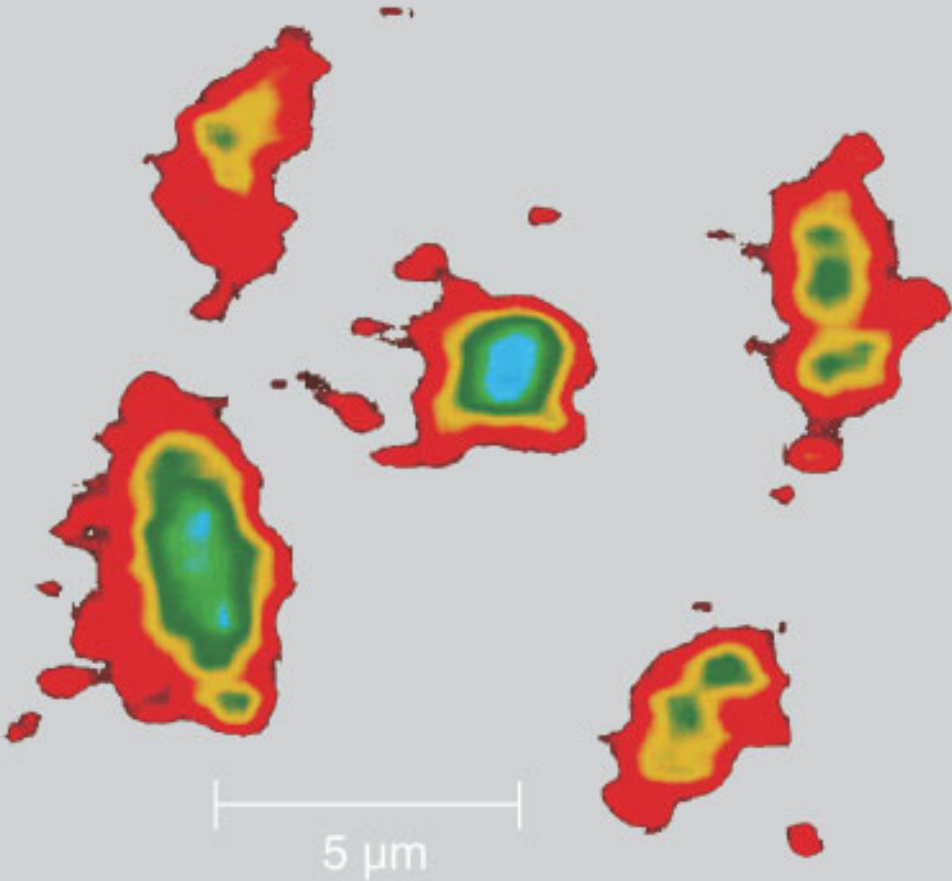
Für ein Referenz-Gaskalorimeter wurde ein neuer Messaufbau zur Bestimmung kleiner Gasmassen entwickelt, bei dem das Gas kontinuierlich aus einem Gasbehälter entnommen und seine Masse mit einer Waage bestimmt wird.

Bestimmung des Brennwertes von natürlichen Erdgasen mit unterschiedlichen Methoden

Da neuere Verfahren zur Brennwertbestimmung von Erdgasen im eichpflichtigen Verkehr auf der Korrelation zwischen physikalischen Stoffeigenschaften und dem Brennwert beruhen, erfordern die Zulassungsprüfungen experimentelle Untersuchungen mit einer großen Bandbreite an Prüfgasen und theoretische Berechnungen des Anwendungsbereichs auf der Basis von Zustandsgleichungen.

Optik

Berichte der Abteilungen



Optik

Die Abteilung *Optik* unterstützt Industrie, Wissenschaft und Gesellschaft durch Bereitstellung von Messmöglichkeiten sowie Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet optischer Technologien. Aufbauend auf den Basiseinheiten von Länge, Zeit und Lichtstärke werden die unterschiedlichen Einheiten dargestellt und weitergegeben sowie höchstgenaue Normale und Messmethoden entwickelt.

Die Abteilung *Optik* realisiert die gesetzliche Zeit in der Bundesrepublik Deutschland, führt Präzisionsmessungen auf unterschiedlichen Gebieten der Optik durch und arbeitet bei der Zertifizierung und der internationalen Normung mit. Mit einem Stammpersonal von gegenwärtig 85 festangestellten Mitarbeitern und 29 temporären, überwiegend Drittmittelbeschäftigten bearbeitet die Abteilung *Optik* ihre Aufgaben in den drei Fachbereichen *Licht und Strahlung*, *Bild- und Wellenoptik* und *Länge und Zeit*.

Weitergabe und Darstellung der Zeit

Mit ihren Zeitsignalausendungen über den Langwellensender DCF77, über das öffentliche Telefonnetz und über das Internet erfüllt die PTB die wichtige Infrastrukturaufgabe der Weitergabe der gesetzlichen Zeit. Trotz der verstärkten Verfügbarkeit von GPS-Empfängern (Global-Positioning System) ist die Aussendung von Zeitsignalen über Langwellensender immer noch aktuell, wie der Neuaufbau und -ausbau solcher Systeme weltweit belegt. In einer kürzlich durchgeführten Studie zum Nutzen der DCF77-Aussendung für die Wirtschaft und den privaten Bereich

Titelbild

Helligkeitsverteilung des Fluoreszenzlichtes von fünf in einer Ionenfalle gespeicherten einzelnen Yb-Ionen in Falschfarbendarstellung. Ein Laser, dessen Frequenz auf einen schmalen optischen Übergang im Yb-Ion stabilisiert ist, stellt den Grundbaustein einer zukünftigen optischen Atomuhr dar, deren Genauigkeit gegenwärtig in der PTB untersucht wird.

konnte eindrucksvoll auch der volks- und betriebswirtschaftliche Nutzen belegt werden. Allein die dem Bund jährlich durch DCF77 zufließende zusätzliche Mehrwertsteuer übersteigt dessen jährliche Aufwendungen um mehr als eine Größenordnung. Der Vorsprung der in Deutschland ansässigen Firmen auf dem Gebiet der Funkuhrtechnologie kann direkt auf den PTB-Service durch den Betrieb des Senders DCF77 zurückgeführt werden. Zur Vorbereitung auf eine mögliche Erweiterung des Service wird gegenwärtig in einem Feldversuch durch die Zentralstelle für Zivilschutz beim Bundesverwaltungsamt unter Mitwirkung der PTB die Mitbenutzung der Langwellenaussendung als Teil eines neuen Warnsystems für Katastrophenfälle geprüft.

Zur Darstellung der deutschen Atomzeitskala UTC(PTB) nutzt die PTB neben den primären klassischen Atomuhren CS1 und CS2, die auf einem thermischen Atomstrahl basieren und seit vielen Jahren im Dauerbetrieb arbeiten, neuerdings die Caesiumfontäne CSF1 mit lasergekühlten Atomen. Es war bereits früher abgeschätzt worden, dass die von CS1 und CS2 erzeugten Sekunden um weniger als $1 \cdot 10^{-14}$ s von der „idealen“ Atomsekunde abweichen, was weniger als einer Milliardstel Sekunde pro Tag entspricht. Die Abschätzungen für die einzelnen primären Uhren konnten im vergangenen Jahr erstmalig validiert werden, da mit der jetzt routinemäßig verfügbaren Caesiumfontäne CSF1 eine Uhr zur Verfügung steht, deren Genauigkeit die von CS1 und CS2 um etwa eine Größenordnung übertrifft (s. Nachrichten aus der Abteilung).

Die Bereitstellung höchstgenauer Zeit für private und kommerzielle Nutzer wird eine der wichtigen Anwendungen des zukünftigen europäischen Satellitennavigationssystems Galileo sein. Dazu muss die Systemzeit von Galileo möglichst gut mit der koordinierten Weltzeit (UTC) übereinstimmen. Da eventuelle Abweichungen immer erst nachträglich festgestellt werden können, wird dem Nutzer

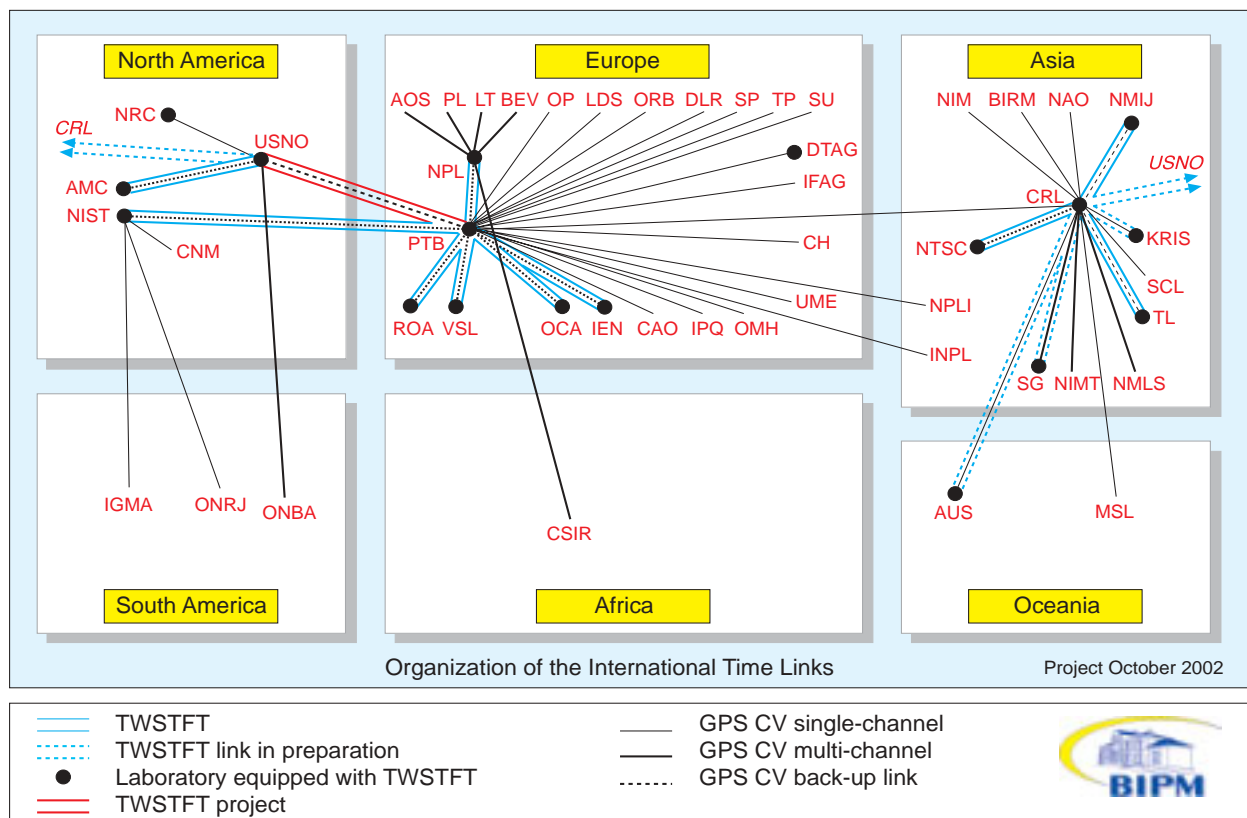
auch die erwartete Abweichung der Galileo-Systemzeit von UTC mitgeteilt. Auf seiner Sitzung am 8.3.2002 hat das Kuratorium dem BMWi und der PTB empfohlen, sich an dem zukünftigen europäischen Satellitennavigationssystem Galileo aktiv zu beteiligen. Zur technischen Realisierung wurde mit der europäischen Weltraumagentur ESA ein Vertrag geschlossen, in dessen Rahmen die PTB im Rahmen eines so genannten „Testbed“ die Systemzeit von Galileo über UTC(PTB) an UTC ankoppelt. In diesem Zusammenhang sind die Anforderungen an die Vorhersagbarkeit der erwarteten Abweichung der verschiedenen Uhren im System so hoch, dass der Einsatz der stabilsten Atomuhr der PTB, der Caesium-Fontäne-Uhr, erforderlich wird. Um für diese zukünftigen Anforderungen des Routinebetriebs gewappnet zu sein, und gleichzeitig den weiteren Fortschritt zu ermöglichen, entwickelt die PTB gegenwärtig eine zweite Fontänenuhr.

Galileo und das US-amerikanische Pendant GPS sollen „interoperabel“ sein. Deshalb ist es wichtig, hochpräzise Vergleiche

Bild 1: Im Netzwerk der Realisierung der universellen koordinierten Weltzeit UTC durch das Internationale Büro für Maße und Gewichte (BIPM) nimmt die PTB in Europa eine zentrale Stellung ein. (Bild mit freundlicher Genehmigung durch das BIPM)

zwischen den Zeitskalen der PTB und dem für die GPS-Systemzeit verantwortlichen *United States Naval Observatory* (USNO) durchzuführen. Zu diesem Zweck wurde 2002 ein kontinuierlicher Zweiwegzeitvergleich mit dem USNO aufgebaut (Bild 1).

Während bei Galileo vornehmlich die langzeitige Stabilität der Uhren gefragt ist, werden für andere Anwendungen die Anforderungen hinsichtlich der Kurzzeitstabilität steigen. Wesentlich höhere Stabilitäten erwartet man von Atomuhren, die statt mit Radiofrequenzen mit optischen Frequenzen betrieben werden. Auf dem Weg zu den zukünftigen optischen Uhren werden gegenwärtig zwei unterschiedliche Ansätze verfolgt: Der erste basiert auf einem einzelnen in einer Radiofrequenzfalle gespeicherten Ion, der zweite auf einer großen Zahl neutraler Atome. Durch das um etwa drei Größenordnungen höhere Signal-zu-Rausch-Verhältnis erwartet man von Uhren mit einem Atomensemble eine höhere Stabilität, von den Einzelionenuhren wegen der fehlenden Wechselwirkung mit anderen Teilchen eine höhere Genauigkeit. Zusätzlich führt die lange Speicher- und Beobachtungszeit, die mit einem einzelnen Ion möglich ist, zu unerreicht hohen Liniengüten. So wurde ein einzelnes Ytterbium-Ion in der PTB kürzlich





in einer Paul-Falle über mehr als 15 Monate gespeichert (Bild 2). Für die geplante Einzelionenuhr wurde im Berichtsjahr ein transportabler Frequenzteiler auf der Basis eines Femtosekundenlasers entwickelt, mit dem beliebige optische Frequenzen in den Mikrowellenbereich heruntergeteilt werden können.

In einer viel beachteten Arbeit wurde gezeigt, wie bei Anwendung einer neuartigen, in der PTB entwickelten Laserkühlmethode in einem Ensemble aus Calciumatomen die wesentlichen Fehlermöglichkeiten bei optischen Frequenznormalen um eine Größenordnung reduziert werden können. Mit einer solchen Anordnung werden dann Stabilitäten möglich werden, die die der gegenwärtig besten Atomuhren um Größenordnungen übersteigen.

Bild 2: Ionenfalle der PTB, die für die Speicherung einzelner Yb-Ionen in einem Frequenznormal verwendet wird

Neue Entwicklungen der optischen Messtechnik

Ihrer Funktion als Schlüsseltechnologie für andere Gebiete der Hochtechnologie kann die Optik nur dann nachkommen, wenn sie kontinuierlich innovative Verfahren, Techniken und Produkte hervorbringt. Die Abteilung *Optik* der PTB entwickelt in diesem Sinne neuartige optische Messverfahren für Anwendungen in Metrologie und Industrie. Vier Beispiele aus der Arbeit des letzten Jahres sollen dies näher erläutern.

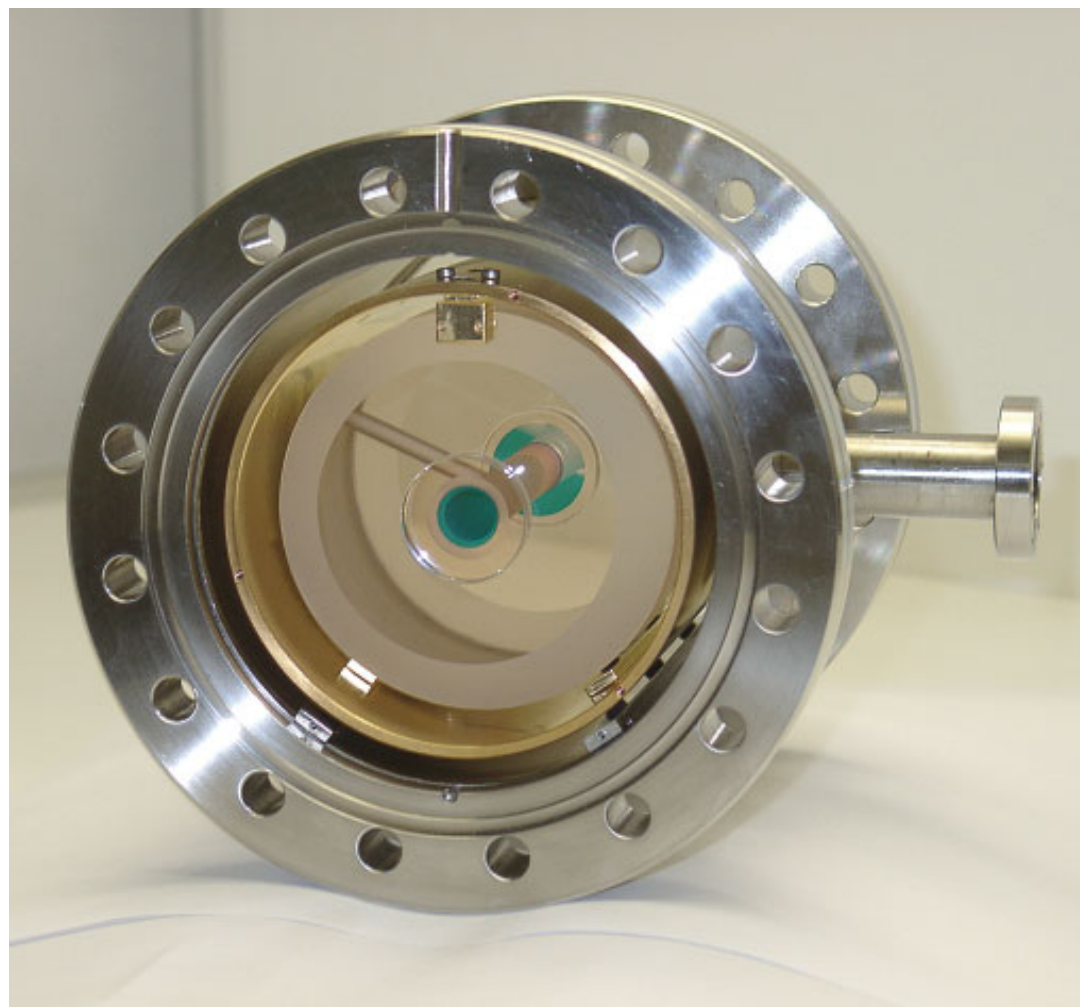
Die präzise Vermessung von Strukturen im μm - und Sub- μm -Bereich gewinnt durch die fortschreitende Miniaturisierung eine immer größere Bedeutung für die Präzision der Fertigung und die Messtechnik in Mikroelektronik und Mikromechanik. Für viele Anwendungen hat die Mikroskopie mit Licht gegenüber der höherauflösenden Elektronen- oder der Kraftmikroskopie wesentliche Vorteile. Bei Messungen von Strukturbreiten, wie sie z. B. in den Masken für die Halbleiterlithographie benötigt werden, mit Abständen im Bereich der verwendeten optischen Wellenlänge verfälschen allerdings Überlagerungen der Beugungsbilder der Strukturkanten das genaue Ergebnis. Neuentwickelte Dunkelfeld- und Durchlichtmikroskopieverfahren mit streifender Beleuchtung reduzieren diese Einflüsse in starkem Maße (s. Nachrichten aus der Abteilung).

Über viele Jahrzehnte war ein flüssiger Quecksilberspiegel das nationale Ebenheitsnormal. Im Rahmen der Aufgabe, hochgenaue Ebenheits- und Geradheitsstandards für die Forschung und Industrie zu entwi-

ckeln, wurde eine Apparatur zur ultrapräzisen und rückführbaren Messung der Topographie ebener und schwach gekrümmter optischer Flächen entwickelt und aufgebaut (s. Nachrichten des Jahres). Die neue Messanlage besitzt das Potenzial, zukünftig als ultrapräzises Primärnormal für Geradheit und Ebenheit mit einer Messunsicherheit im Sub-nm-Bereich den gestiegenen Genauigkeitsanforderungen von Forschung und Industrie besser gerecht zu werden und den Quecksilberspiegel zu ersetzen.

Die Verfügbarkeit von höchstgenauen Laserwellenlängen und -frequenznormalen ermöglicht die Messung von kleinsten Längenänderungen an ultrastabilen Materialien, die z. B. durch thermische Ausdehnung oder langzeitige Relaxationseffekte bedingt sind. Ein Messverfahren, das gegenwärtig für den industriellen Einsatz weiterentwickelt wird, misst diese Längenänderungen durch die Änderungen der Resonanzfrequenzen eines optischen Resonators (Bild 3) durch Vergleich mit einem Frequenznormal.

Bild 3: Optischer Resonator höchster Finesse umgeben von einem Strahlungsschild zur thermischen Abschirmung im Innern einer Vakuumkammer. Resonatoren dieses Typs werden in der PTB u. a. zur Bestimmung des thermischen Ausdehnungskoeffizienten von Hochtechnologiematerialien, zur Frequenzstabilisierung von höchststabilen Laserquellen oder zur Bestimmung des Reflexionskoeffizienten von Super spiegeln eingesetzt.



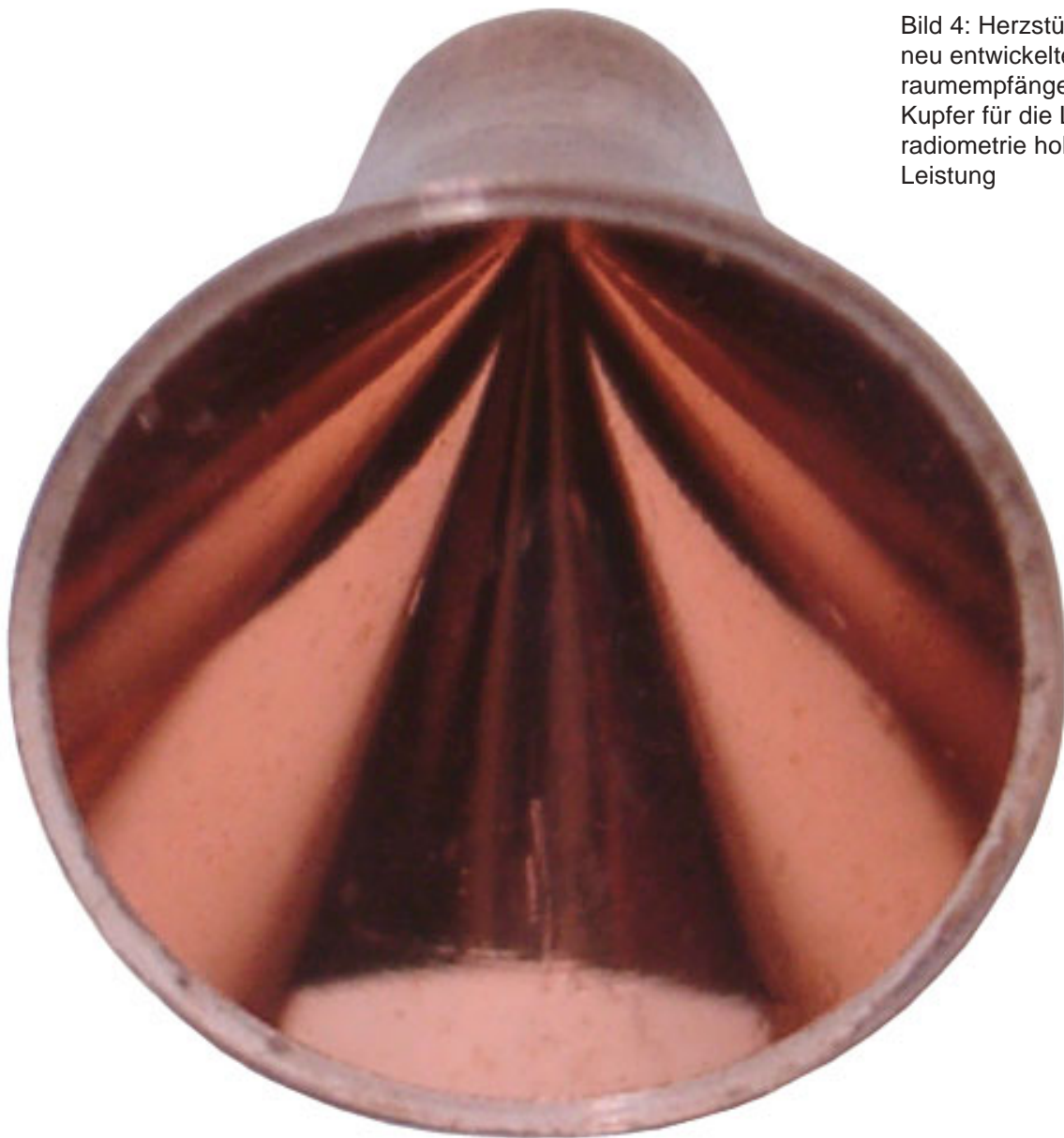


Bild 4: Herzstück des neu entwickelten Hohlraumempfängers aus Kupfer für die Laserstrahlradiometrie hoher Leistung

In vielen Präzisionsexperimenten begrenzt die erreichbare Qualität der Laserwellenfronten die erreichbare Genauigkeit. So führen beispielsweise in optischen Frequenznormalen auf der Basis von Neutralatomen Abweichungen der anregenden Laserstrahlen von ideal ebenen Wellenfronten in Verbindung mit der atomaren Bewegung zu Frequenzfehlern. Ähnliche Effekte treten in Atominterferometern auf, bei denen Atomwellen mit Hilfe von Laserstrahlen aufgespalten, umgelenkt und wieder zusammengeführt werden und wo unvollkommene Wellenfronten zu Phasenverschiebungen führen. Im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 407 der *Universität Hannover* „Quantenlimitierte Messprozesse“, an dem die PTB mit mehreren Projekten beteiligt ist, wurden daher licht- und atomoptische Interferometrie-Methoden kombiniert, um Phasenfehler weitgehend zu vermeiden. In beiden Bereichen sind im ver-

gangenen Jahr Durchbrüche erzielt worden. Mit einem neu entwickelten Kalibrierverfahren für kommerzielle Wellenfrontsensoren können jetzt Aberrationen von besser als $1/100$ über einen Laserstrahldurchmesser von 4 mm nachgewiesen und gegebenenfalls korrigiert werden. Eine ähnliche Präzision lässt sich mit einem neuentwickelten Verfahren durch die kombinierte Anwendung verschiedener gepulster Atominterferometer erzielen. Von der Verbesserung durch die gemeinsame Anwendung von atom- und lichtinterferometrischen Messmethoden haben gegenwärtig am meisten die atominterferometrischen Anwendungen profitiert. Die Vorteile für die klassischen Methoden ergeben sich dabei durch die Verwendung eines unabhängigen Verfahrens, durch das sich systematische Fehler erkennen, korrigieren und zukünftig verstärkt eliminieren lassen.



Laserradiometrie

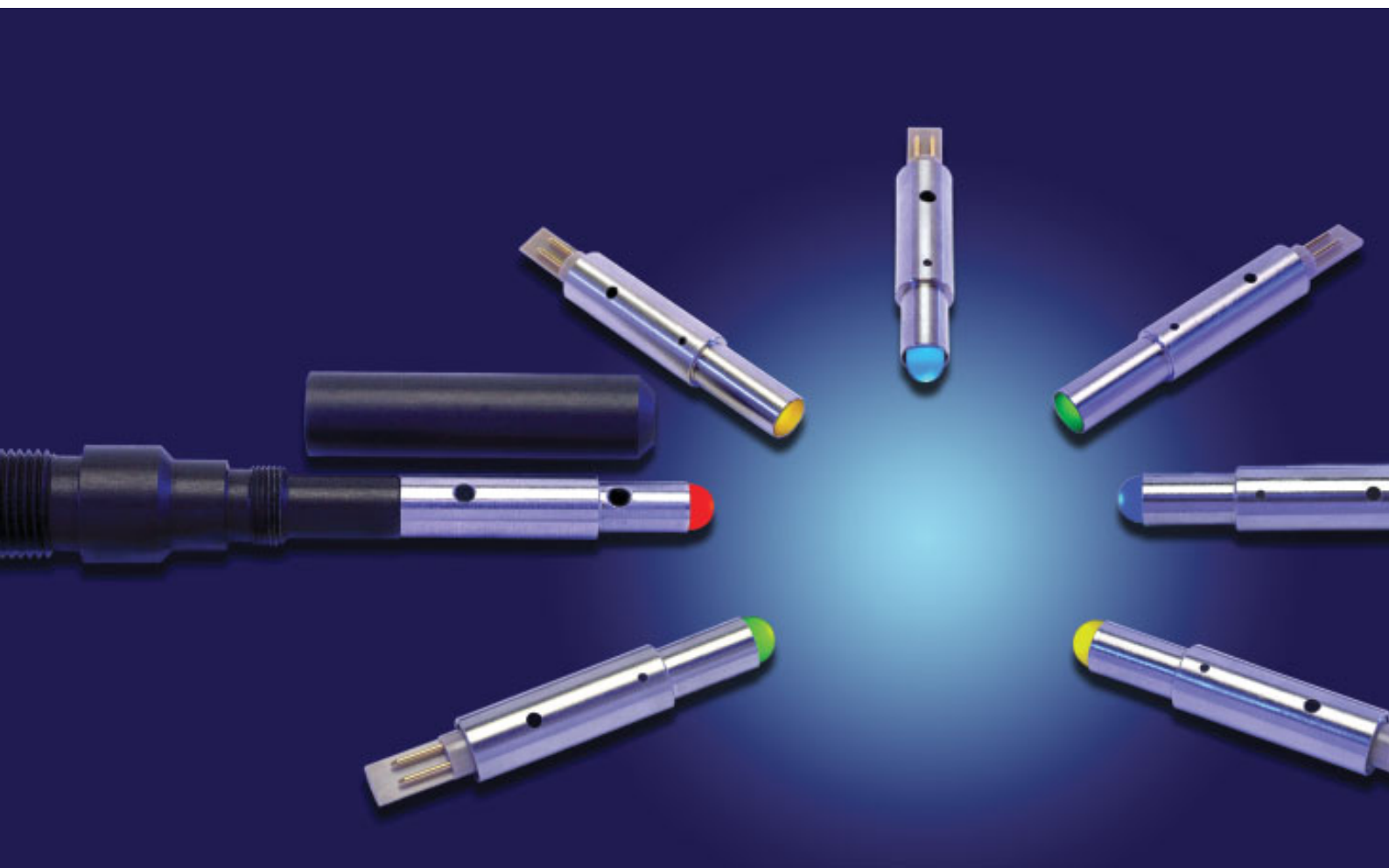
Die Anforderungen an die Messung und Charakterisierung der Strahlung von Hochleistungslasern steigen stetig. Dabei geht der Trend einerseits zu immer kürzeren Wellenlängen, andererseits zu höheren Leistungen und Repetitionsraten. Die PTB hat dieser Entwicklung Rechnung getragen, indem sie die „Laserradiometrie“ als Schwerpunkt eingerichtet hat. Hochleistungslaser mit kürzeren Laserwellenlängen im ultravioletten (UV) und Vakuum-UV-Spektralbereich werden in immer stärkerem Maß für die Halbleiterlithographie benötigt. Für Kalibrierungen in diesem Bereich hat die PTB dafür als Primärnormal einen Kegelempfänger (s. Bild 4 und Nachrichten aus der Abteilung) entwickelt und die radiometrische Skale für Laserleistungen bis zur Excimerlaserwellenlänge von 193 nm, zu einer Leistung von 0,5 W und einer Repetitionsrate von 0,2 kHz ausgeweitet.

Zur weiteren Messbereichs-Ausdehnung bis zur Wellenlänge des Excimerlasers bei 157 nm wird zurzeit ein Messplatz für radiometrische Messungen im Vakuum-UV aufgebaut.

Femtosekundenlasermesstechnik

Die Messtechnik für gepulste Strahlung stellt besonders hohe Anforderungen bei Femtosekundenimpulslasern, die in den unterschiedlichsten Gebieten wie der Medizin, der Materialbearbeitung oder bei der Messtechnik steigende Verbreitung finden. Im vergangenen Jahr wurde eine rückführbare Messtechnik für die Energie der Laserimpulse als Grundlage einer Laserradiometrie im Gebiet der fs-Quellen entwickelt. Sie wird u. a. für die Charakterisierung von Laserschutzfiltern benötigt, die im Femtosekundenbereich den Effekt der induzierten Transmission zeigen und dabei ihre Schutzfunktion verlieren können. Mit einem neuen Messplatz kann jetzt die Abhängigkeit des spektralen Transmissionsgrads von der Bestrahlung über mehrere Größenordnungen untersucht werden (s. Nachrichten aus der Abteilung).

Bild 5: Satz unterschiedlicher LED-Transfornormale mit Justierhilfen (Halterung und Fixierhülse)



Neue Methoden der Femtosekundenmesstechnik erlauben sowohl die Erzeugung von ultrakurzen Spannungspulsen sowie deren Charakterisierung durch elektrooptische Abtastmethoden. Damit können Änderungen der Form der elektrischen Impulse bei der Ausbreitung in Hochfrequenzschaltungen messtechnisch und modellmäßig erfasst werden. Im Berichtszeitraum gelang mit diesen Techniken die Charakterisierung des Übertragungsverhaltens einer Mikrowellenabtastspitze im Frequenzbereich zwischen 10 GHz bis 0,3 THz.

Photometrie: Messtechnik für Licht und Beleuchtung

Die Lichtquellen der Zukunft werden nur wenig mit den heute gebräuchlichen Leuchten wie Glühlampen oder Leuchtstoffröhren gemein haben. Damit werden sich in wenigen Jahren die Anforderungen an die Photometrie in starkem Maße verändern, um beispielsweise quecksilberfreie Lampen, „Tapeten“ aus Leuchtdioden, planare Strahler oder Displays quantitativ charakterisieren zu können. Die PTB stimmt ihre Messmöglichkeiten im neuen Gebäude für die Optik (Albert-Einstein-Bau), das im Frühjahr 2003 bezogen werden soll, auf diesen neuen Bedarf ab. Dazu wurde bereits eine Messeinrichtung zur Bestimmung der photometrischen und colorimetrischen Eigenschaften von Displays und anderen flächenhaften Strahlern aufgebaut.

Gegenwärtig wird für den Albert-Einstein-Bau ein robotergestütztes Goniophotometer mit einem völlig neuartigen Gerätekonzept für die Realisierung der Lichtstromeinheit und zur Weitergabe dieser Einheit mit bekannter Äquivalenz zu globalen Referenzwerten entwickelt. Im Gegensatz zu bisher genutzten Konzepten wird ein Roboter die Brennlage der Strahlungsquelle mit einer

Maximallänge bis 2,5 m vorgeben und sie im Zentrum des Goniophotometers positionieren. Zwei weitere Roboter richten angepasste Messköpfe zum Zentrum und führen sie auf Bahnen mit Radien bis zu 3,0 m um die Strahlungsquelle. Die Aufteilung in zwei Hemisphären mit variablen Radien wird auch für größere Leuchten photometrische Messungen im Nah- und Fernfeld erlauben.

Zur Weitergabe von photometrischen und colorimetrischen Größen hat die PTB Leuchtdiodentransfernormale entwickelt, deren hervorragende Eignung durch einen kürzlich durchgeführten internationalen Vergleich von Lichtstrom und Lichtstärke nachgewiesen wurde (s. Bild 5 und Nachrichten aus der Abteilung).

Röntgenmetrologie

Im Jahr 2002 wurde ein neues Projekt *Röntgenmetrologie mit Kristallen* in der Abteilung *Optik* der PTB eingerichtet. Ein Ziel des Projekts besteht in der Neubestimmung der Avogadrokonstanten, die das Mol als Einheit der Substanz und das Kilogramm als Einheit der Masse miteinander verknüpft. Im Rahmen des Vorläuferprojekts konnten im Berichtsjahr die Messungen der Avogadrokonstante an Silizium mit natürlicher Isotopenzusammensetzung mit einer relativen Messunsicherheit von $2,9 \cdot 10^{-7}$ abgeschlossen werden (s. Nachrichten aus der Abteilung). Zur weiteren Verringerung der Messunsicherheit ist geplant, innerhalb eines internationalen Projekts mit angereichertem Silizium ^{28}Si eine Verbesserung um den Faktor 10 zu erreichen. Mit der Ansiedlung des Projekts im Teilfachbereich *Länge* verspricht sich die PTB Vorteile bei der genaueren Realisierung der Längeneinheit durch Wellenlängenmessungen bis in den Röntgenbereich.

In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

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

Grundlagen der Metrologie

Neubestimmung der Avogadrokonstante

Im Rahmen des Avogadroprojekts der PTB konnten die Messungen an Silizium mit natürlicher Isotopenzusammensetzung abgeschlossen werden und ergaben einen Wert von $N_A = 6,022\,135\,7\,\text{mol}^{-1}$ mit einer relativen Unsicherheit von $2,9 \cdot 10^{-7}$.

Diodenlasersystem für die höchstauflösende Spektroskopie

Mit einem neu entwickelten frequenzstabilisierten Diodenlasersystem lassen sich Linienbreiten im Hertz-Bereich erzielen. Das Diodenlasersystem soll das bisher im optischen Ca-Frequenznormal verwendete aufwendige Farbstofflasersystem bei verbesserter Frequenzstabilität ersetzen.

Langzeitvergleich zwischen den primären Uhren der PTB

Die hohe Genauigkeit der neuen Fontänenuhr CSF1 der PTB ermöglichte jetzt die Überprüfung der bisher besten primären Uhren CS1 und CS2 der PTB, die seit vielen Jahren das Rückgrat der internationalen Atomzeitskala bilden, und bestätigt deren früher abgeschätzte Unsicherheit.

Neuer Kandidat für die Referenz in einer optischen Atomuhr

Das Isotop 229 des Thoriums besitzt einen langlebigen angeregten Zustand im Atomkern, dessen Energie so niedrig liegt, dass er optisch angeregt werden kann. Es konnte theoretisch gezeigt werden, dass die Frequenz dieses Kernübergangs unabhängig von äußeren Einflüssen ist bis zu einem Grad, der mit Übergängen in der Elektronenhülle eines Atoms nicht erreichbar ist.

Kalibrierung neuartiger Solarzellen

Die spektrale Kalibrierung von Ge-Tripelzellen für die Raumfahrtforschung ist aufgrund ihrer material- und technologiebedingten Eigenschaften sehr aufwendig und kann derzeit nur an der Solarzellen-Kalibrieranlage der PTB durchgeführt werden.

Entwicklung eines detektorgestützten UV-Strahlersystems als TransfERNormal für die spektrale Bestrahlungsstärke

Es wurde ein UV-Strahler entwickelt, der gestützt durch Messungen mit einem Monitordetektor als hochwertiges TransfERNormal-System für die Bewahrung und Weitergabe der Einheit der spektralen Bestrahlungsstärke im Spektralbereich von 200 nm bis 400 nm eingesetzt werden kann.

Femtosekundenlaser-Messtechnik

Die Erzeugung und Vermessung ultrakurzer Spannungsimpulse, die mit Femtosekunden-Lasertechniken erzeugt werden, ermöglichen die Charakterisierung von elektronischen Hochfrequenzbauteilen bis zu Frequenzen von 300 GHz.

Neuartiges Durchlicht-Mikroskopieverfahren

Das für Strukturen auf transparenten Substraten entwickelte Mikroskopieverfahren ist besonders empfindlich für oberflächennahe Bereiche und findet Anwendung im Bereich der Inspektionssysteme für Photomasken in der Halbleiterindustrie sowie in der Strukturgrößencharakterisierung von Nano- und Mikropartikeln.

Wellenfrontmessungen mit optischen und atomoptischen Methoden

Mit neu entwickelten Verfahren lassen sich Krümmung und höhere Aberrationen in Laserstrahlen messen und eliminieren. Dadurch lassen sich wesentlich kleinere Unsicherheiten in optischen Uhren und Atominterferometern erreichen.

Metrologie für die Wirtschaft

Laserradiometrie für UV-Laser bei 193 nm

Laserleistungskalibrierungen bei der Excimer-Laserwellenlänge von 193 nm sind jetzt bis zu Laserleistungen von 500 mW bei 200 Hz Repetitionsrate mit einer erweiterten Unsicherheit ($k = 2$) kleiner 1,6 % möglich.

Messung des thermischen Ausdehnungskoeffizienten von hochkonstanten Materialien für die EUV-Lithographie

Extrem kleine relative Längenänderungen lassen sich über die Änderung der Eigenfrequenzen von Fabry-Perot-Resonatoren und deren Vergleich mit optischen Frequenznormalen bestimmen.

Zertifizierte Referenzmaterialien für die optische Telekommunikation

Die PTB stellt neu entwickelte Messtechniken zur rückführbaren Messung von wellenlängenselektiven Komponenten für die optische Telekommunikation bereit.

Metrologie für die Gesellschaft

Induzierte Transmission an Laserschutzfiltern im Femtosekunden-Bereich

Die Untersuchungen der induzierten Transmission an Laserschutzfiltern wurden an einem neu entwickelten Messplatz in den fs-Bereich ausgedehnt.

Bewertung der Bildqualität von Bildausgabegeräten für medizinische Röntgenbilder

Im Rahmen eines von der *Europäischen Kommission* geförderten Vorhabens wurde ein Testverfahren entwickelt, das es gestattet, mit Hilfe eines einzigen Ausdrucks u. a. die Messung der Kennlinie, der Ortsauflösung und der Modulationsübertragungsfunktion, des Rauschens sowie die Prüfung auf Homogenität und Linearität der Grauwert-Wiedergabe und den Test auf Artefakte durchzuführen.

Messung der Modulationsübertragungsfunktion digitaler Röntgenbild-Detektoren

Die PTB hat in Zusammenarbeit mit einem Industriepartner eine vereinfachte Methode zur Messung der Modulationsübertragungsfunktion digitaler Röntgenbilddetektoren entwickelt, bei der Justier- und Rechenaufwand wesentlich reduziert ist.

Internationale Angelegenheiten

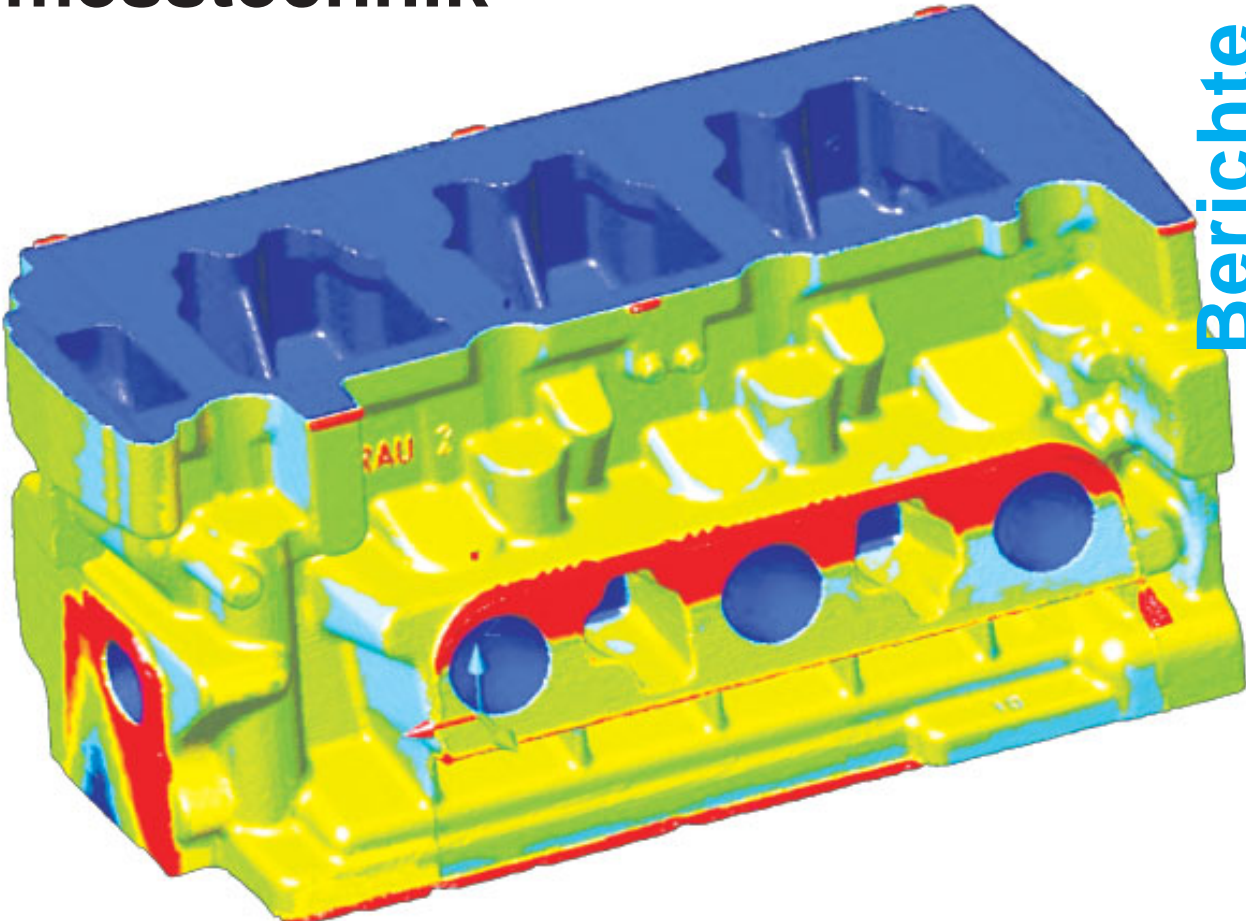
Erste Vergleichsmessungen mit Hilfe neu entwickelter Leuchtdioden-Transferrnormale für Lichtstrom, Lichtstärke und spektrale Kenngrößen

Bei einem ersten bilateralen LED-Vergleich zwischen NIST und PTB mit Hilfe neu entwickelter LED-Transferrnormale wichen die Ergebnisse für die Lichtstärke bei einer abgegebenen Messunsicherheit zwischen 1,5 % und 3,5 % (für $k = 2$, in Abhängigkeit vom Spektralbereich) im Einzelfall um nicht mehr als 0,8 % voneinander ab.

Internationaler Vergleich von Gonioreflektometern

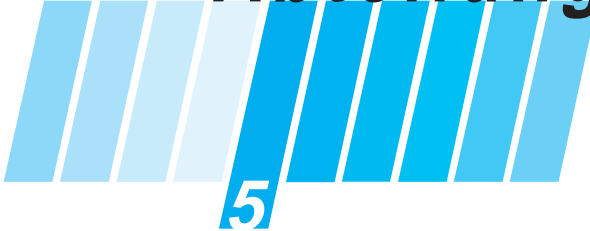
Basierend auf Verbesserungen am Gonioreflektometer der PTB und gestützt auf internationale Vergleichsmessungen können jetzt gonioreflektometrische Kalibrierungen international äquivalent mit Messunsicherheiten im Bereich von 1 % ($k = 2$) durchgeführt werden.

Fertigungs- messtechnik



Berichte der Abteilungen

Abteilung



5

Fertigungs

Ein auf den Bedarf in Industrie und Wissenschaft abgestimmtes FuE-Programm für die Jahre 2002 bis 2005

Zum Aufgabenbereich der Abteilung *Fertigungsmesstechnik* wurde für die Jahre 2002 bis 2005 ein Forschungs- und Entwicklungsprogramm erarbeitet.

Das Programm lässt die längerfristig angelegte strategische Zielstellung erkennen.

Zur Darstellung der Ausgangssituation vermittelt das Programm zunächst einen Überblick über

- den Personal- und Sachmitteleinsatz
- Ergebnisse in den Jahren 1997 bis 2000, z. B. ausgewählte Geräte- und Methodenentwicklungen, Normen- und Gremienarbeit, Öffentlichkeitsarbeit, Patentanmeldungen, eingeworbene Drittmittel als Indikator externer Forschungsförderung und
- den erreichten Stand der Mess- und Kalibriermöglichkeiten Ende 2001.

Den Hauptteil des FuE-Programms bilden die Aussagen zu den wissenschaftlich-technischen Zielstellungen für den Zeitraum 2002 bis 2005. Sie sind in neun Abschnitte gegliedert, z. B. in

- Nanometrologie (dimensionelle und ausgewählte weitere Messungen)
- Dimensionelles Messen für die Mikrosystemtechnik

Titelbild

Vergleich von Messdaten aus einem industriellen Röntgen-Computertomographen mit der Nominalgeometrie eines Zylinderskopfes (CAD-Modell). Einfärbungen im Bild kennzeichnen ermittelte Geometrieabweichungen.

Die PTB-Aufgabe besteht darin, eine Lösung für die Rückführbarkeit der computertomographischen Messergebnisse zu finden.

© Rautenbach AG, Wernigerode

- Interferentielle Längenmesstechnik
- Verfahren und Einrichtungen für Untersuchungen von hochwertigen 1-D- und 2-D-Präzisionsteilungen
- Koordinatenmesstechnik
- Wissenschaftlicher Gerätebau.

Der Entwurf dieses Programms fußt auf eigener FuE-Tätigkeit, auf permanent erfolgenden Recherchen, zahlreichen Kontakten zu Wirtschaft und Wissenschaft sowie nationalen und internationalen Fachgremien.

Der Entwurf wurde Anfang 2002 mit rund 80 repräsentativen Partnern aus der Wirtschaft (Messmittel herstellende und anwendende Unternehmen, DKD) und Wissenschaft (insbesondere einschlägige universitäre und Fraunhofer-Institute) inhaltlich abgestimmt. Dies war das angestrebte Hauptziel. Es entstand eine Arbeitsunterlage, die den Bedarf der Wirtschaft und einschlägigen Forschungseinrichtungen nach metrologischen FuE-Leistungen auf dem Gebiet Fertigungsmesstechnik ausweist. Außerdem bietet das FuE-Programm einen Ansatz, die Zusammenarbeit mit Unternehmen, Forschungseinrichtungen und wissenschaftlich-technischen Gremien wie VDI/VDI-GMA und DIN weiter zu entwickeln und die FuE-Tätigkeit der Abteilung transparenter zu gestalten.

Die Jahresberichte für die Jahre 2000 und 2001 enthalten zur Tätigkeit der Abteilung jeweils thematische Übersichten, in denen über Entwicklungstendenzen, Vorhaben und Ergebnisse zu Themenkreisen berichtet wird, die in den erwähnten Abschnitten des FuE-Programms wiederzufinden sind. Im Jahresbericht 2000 waren es Aussagen zur Koordinatenmesstechnik, zur interferentiellen Längenmesstechnik und Metrologie für die Mikro- und Nanotechnik, im Bericht 2001 Aussagen über 1-D-Präzisions-Längenmesstechnik sowie über Nanometrologie.

messtechnik

Hier wird über folgende thematische Schwerpunkte berichtet:

- taktile (überwiegend dimensionelle) Messtechnik für die Lösung technologischer Fragestellungen aus der Mikrosystemtechnik und einem daraus ableitbaren weiteren
- Ausbau der Mikrofertigung im wissenschaftlichen Gerätebau.

Taktile dimensionelle Messtechnik zu Fragestellungen aus der Mikrosystemtechnik

Produkte mit mikrosystemtechnisch hergestellten wesentlichen Komponenten dringen immer mehr in Bereiche des täglichen Lebens ein. Vom Tintenstrahldrucker über Beschleunigungssensoren im PKW bis zur Mikrowelle oder zum Kühlschrank erstreckt sich die Liste der Erzeugnisse, die sich in ihren Leistungsparametern durch Einsatz von Mikrotechnik herausheben. Aus der fortschreitenden Miniaturisierung ergeben sich zwangsläufig neuartige Anforderungen an die fertigungsbegleitende (prozessorientierte) Qualitätssicherung. Weil die etablierten Oberflächen- und Koordinatenmesstechniken für Messungen an Mikrostrukturen erwartungsgemäß nur bedingt einsetzbar sind, entstehen Herausforderungen an das dimensionelle Messen, die erheblich über die Anforderungen aus der Mikroelektroniktechnologie hinausgehen. So gibt es für Mikrostrukturen bisher auf dem Markt nur ein taktilen Antastsystem für Koordinatenmessgeräte. Mit diesem opto-taktilen 2-D-Fasertaster, der auf einer PTB-Entwicklung beruht, lassen sich Mikrostrukturen zweidimensional mit Antastunsicherheiten unter $0,5\ \mu\text{m}$ messen. Der Prototyp eines opto-taktilen Fasertasters mit vollständiger 3-D-Messfähigkeit ist in der PTB bereits im Einsatz.

Ein alternativer Lösungsansatz zum 2-D- bzw. 3-D-Fasertaster wird mit der Entwicklung eines 3-D-Mikrotasters (Bild 1) verfolgt. Diese

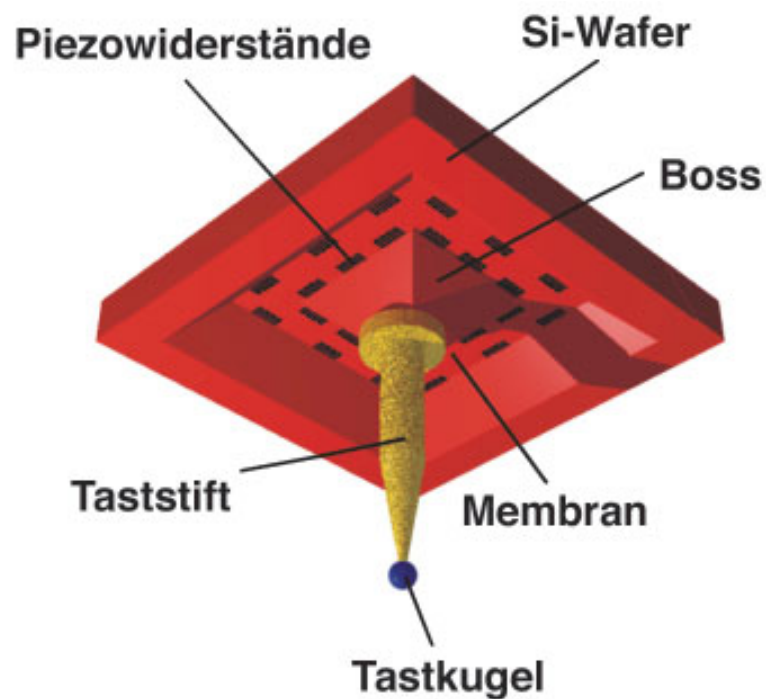


Bild 1: 3-D-Mikrotaster
oben: Prinzipbild,
unten: Prototyp



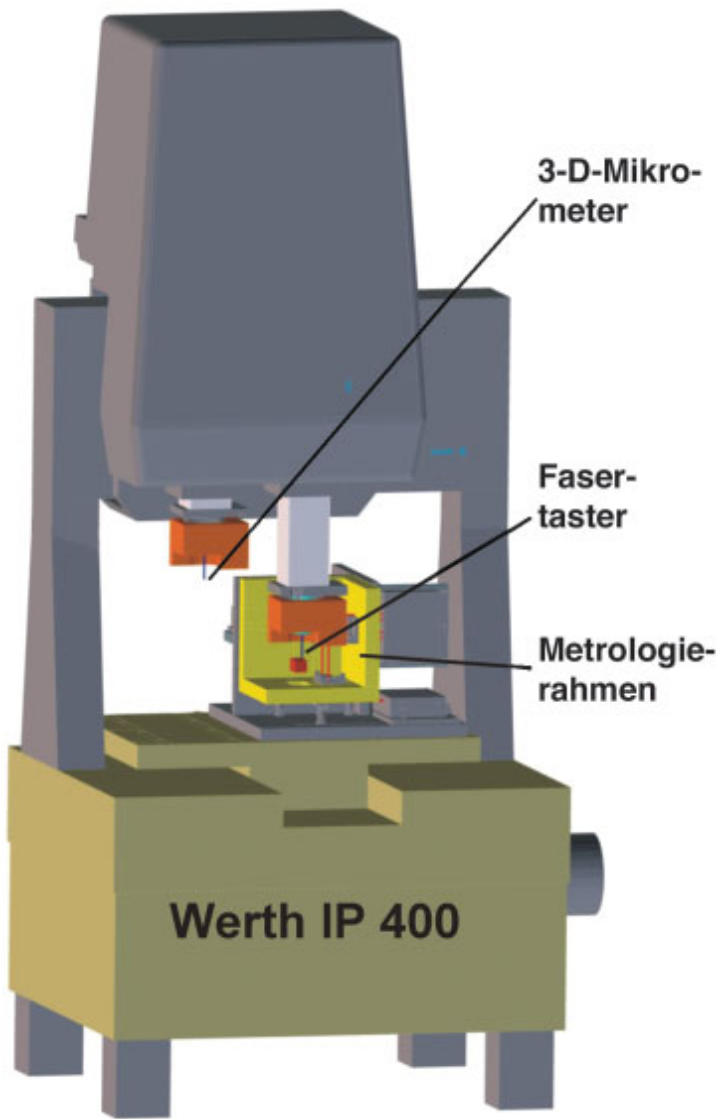
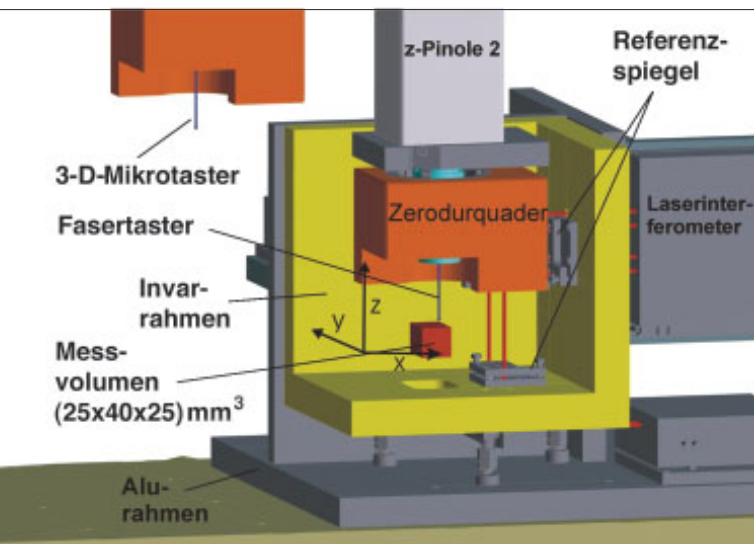


Bild 2: 3-D-Mikromesseinrichtung (3D-MME)

Bild 3: Metrologiesystem der 3D-MME



Entwicklung erfolgt im Rahmen des von der DFG geförderten Sonderforschungsbereichs 516 „Konstruktion und Fertigung aktiver Mikrosysteme“ in Zusammenarbeit mit dem Institut für Mikrotechnik der TU Braunschweig.

Der messende Taster kann sowohl für dimensionelle 3-D-Messungen als auch für die Ermittlung von kleinen 3-D-Kräften eingesetzt werden. Für die Kalibrierung als Kraftsensor wird eine dafür entwickelte Mikrokräftmess-einrichtung eingesetzt. Die Ermittlung mechanischer Eigenschaften ist somit ein weiteres potenzielles Einsatzgebiet. Die Umsetzung des Tasters in ein marktfähiges Produkt wird zurzeit vorbereitet. Bislang werden dazu noch kommerziell erhältliche Taststifte mit Tastkugeldurchmessern von 300 µm eingesetzt. Künftige Arbeiten konzentrieren sich auf die Verkleinerung der Antastelemente und deren Mikromontage.

Weitere Entwicklungsarbeiten zu Antastsystemen, die für die Mikrosystemtechnik interessant sind, richten sich auf aus der Rasterkraftmikroskopie bekannte Silizium-Biegebalken (Cantilever). Die Silizium-Biegebalken – mit Halbleiterwiderstandsbrücken ausgestattet – sollen für geometrische oder Mikrokräftmessungen einsetzbar sein. Mögliche Einsatzfälle sind z. B. Tastschnittsensoren der weiter unten vorgestellten 3-D-Mikromesseinrichtung für die Messung von Rauheit, Welligkeit und Form an vertikalen Wänden in Mikrobohrungen mit Durchmessern kleiner 50 µm. Die Entwicklung dieser Taster erfolgt in Kooperation mit dem *Institut für Halbleitertechnik* der *TU Braunschweig* und dem *Institut für Mikrosystem- und Halbleitertechnik* der *TU Chemnitz*.

Neben geeigneten Antastsystemen werden insgesamt leistungsfähigere Messmaschinen und dazu gehörige Konzepte für die häufig hohen messtechnischen Anforderungen an die Mikrosystem-Messtechnik benötigt. Mit konventioneller Koordinatenmesstechnik ist die teils erforderliche Messunsicherheit $< 0,1 \mu\text{m}$ nicht erreichbar. Für sehr genaue dimensionelle Messungen an Mikrostrukturen wird deshalb in der PTB eine 3-D-Mikromesseinrichtung (3D-MME) entwickelt. Als Basis dient eine kommerziell erhältliche Koordinatenmessmaschine (Bild 2). Sie wurde vom Hersteller mit verbesserten Luftlagern und

hochauflösenden Positionsmesssystemen ausgestattet.

Zur Reduzierung der Messunsicherheit wurde ein „Metrologiesystem“ mit laserinterferometrischer Positions- und Winkelmessung in die Messeinrichtung integriert (Bild 3).

In einem Messvolumen mit Abmessungen von 25 mm \times 40 mm \times 25 mm soll mit dem oben erwähnten Fasertaster sowie alternativ mit dem 3-D-Mikrotaster eine erweiterte Messunsicherheit $< 0,1 \mu\text{m}$ realisiert werden. Bisherige Ergebnisse lassen erwarten, dass dieses Ziel nach weiterer Optimierung erreicht wird.

Ausbau der Mikrofertigung im Wissenschaftlichen Gerätebau

Die Beispiele zur Messtechnik zeigen, dass mit der Verwendung kommerzieller Messgeräte die anspruchsvollen Aufgaben der Mikromesstechnik nicht gelöst werden können. Sofern auf kommerzielle Geräte zurückgegriffen werden kann, müssen diese überwiegend modifiziert (Beispiel 3-D-MME) sowie zusätzlich notwendige Komponenten entwickelt und gefertigt werden (Beispiel Taststifte). Der *Wissenschaftliche Gerätebau* der PTB stellt sich dieser Herausforderung und baut unter Berücksichtigung wirtschaftlicher Gesichtspunkte seine Fähigkeiten aus, um kleinste Bauteile zu fertigen und Strukturen in Mikrometergröße herzustellen. Hierzu werden die folgenden vier Verfahren bzw. Bearbeitungseinrichtungen bereits genutzt oder zurzeit in der PTB aufgebaut.

In diesem Zusammenhang soll darauf hingewiesen werden, dass die zunehmende Verflechtung von anspruchsvollen Fertigungs- und Messaufgaben eine verstärkte Einbeziehung der Messfähigkeiten der Abteilung zur Folge hat.

Mikro-Erodieren

Mit der Integration eines besonders fein regelbaren Impulsgenerators in einer CNC-Senk-Erodiemaschine wurde die Basis für die Mikrobearbeitung geschaffen. Durch Mikro-Erosion werden Bohrungen mit einem Durchmesser von weniger als $50 \mu\text{m}$ bei einem Aspektverhältnis von bis zu 100 in der Oberfläche von elektrisch leitenden Werkstoffen hergestellt. Unter Verwendung einer Bahn-

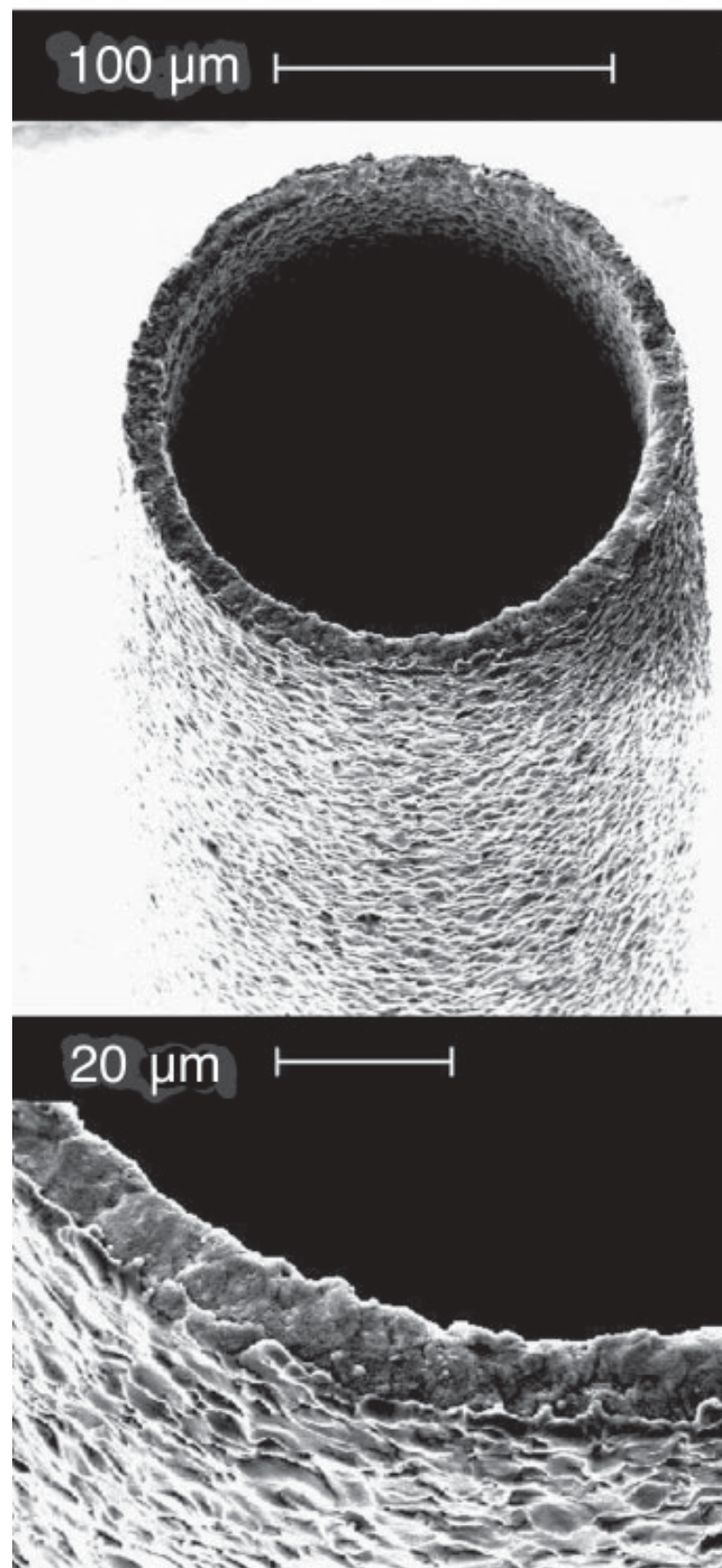


Bild 4: Düsen Spitze aus einer Titanlegierung, hergestellt durch Senk-Erodieren

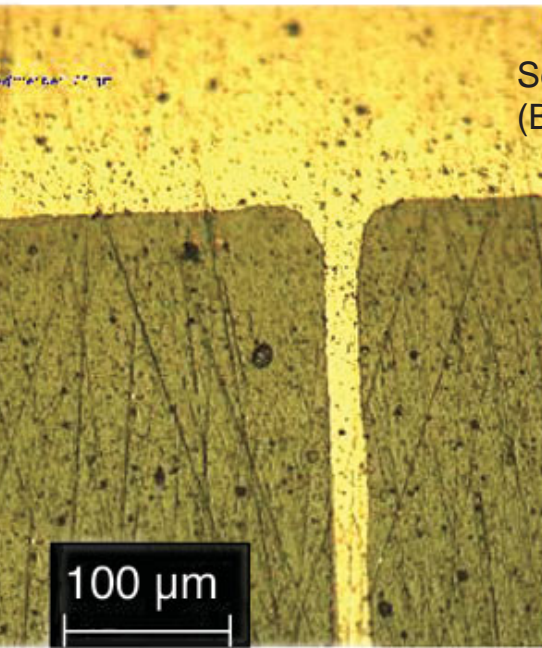


Bild 5: Dünnschichtkraftaufnehmer auf einer Stahlwelle



steuerung können auch Mikrostrukturen erzeugt werden. Die Mikro-Elektroden können in der Maschine, d. h. ohne späteres Umspannen, mit einer zusätzlichen Draht-Erodiervorrichtung hochgenau hergestellt werden. Bild 4 zeigt als Beispiel eine aus Titan hergestellte Düsen Spitze.

Dünnschichttechnik

Für die Abscheidung von Funktionsschichten stehen zwei Hochvakuum-Beschichtungsanlagen zur Verfügung (thermisches Verdampfen sowie Magnetronspütern im Hochfrequenz- und Gleichstrombetrieb). Neben der individuellen Zugabe von verschiedenen Reaktivgasen können während der Beschichtung an die zu beschichtenden Bauteile auch elektrische Vorspannungen (Bias) angelegt werden, was zu einer deutlich höheren Schichthaftung führt. Die Anlagen werden insbesondere für die Sensorik genutzt, wobei neben der „Makrosensorik“

(z. B. Platinelektrode auf Keramikplatte für die elektrolytische Messzelle) zunehmend integrierte Messsysteme entwickelt werden. Bild 5 zeigt ein Beispiel, bei dem auf einer Stahlwelle ein Dünnschichtkraftaufnehmer aufgebaut wurde. Mit einer Dicke von 10 µm und einer Breite von 20 µm kann die Belastung der Stahlwelle unter realen Anwendungsbedingungen ermittelt werden. Dabei beträgt die Dicke der eigentlichen Messschicht, die aus Manganin besteht, nur 50 nm.

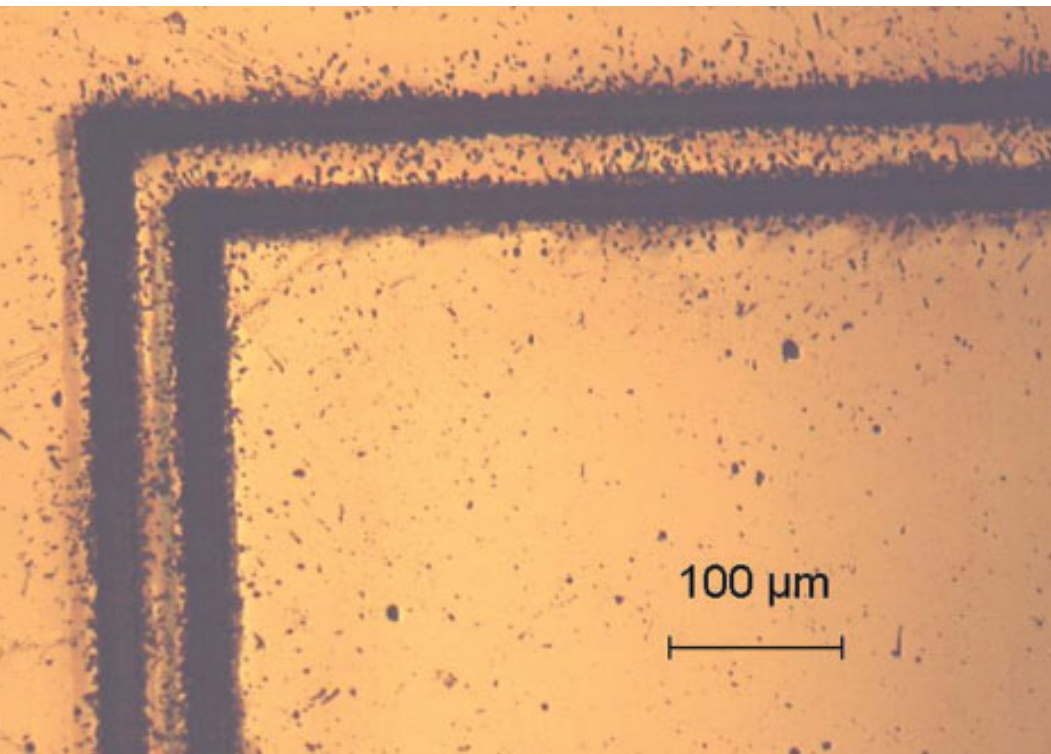


Bild 6: Oberfläche einer laserstrukturierten, supraleitenden Niob-Dünnschicht auf einem Glassubstrat

Laserbearbeitung

Besonders feine Strukturen und Mikrobohrungen lassen sich mittels ultravioletter Laserstrahlung herstellen. Im *Wissenschaftlichen Gerätebau* wird hierfür ein diodengepumpter Nd:YVO₄-Laser mit einer Wellenlänge von 355 nm und Pulslängen von ca. 30 ns verwendet. Besonders vorteilhaft ist bei der Laserbearbeitung, dass auch elektrisch nichtleitende Materialien, wie Keramiken und geeignete Kunststoffe, bearbeitet werden können. Markierungen auf Glas sind ebenfalls möglich. Bild 6 zeigt ein Anwendungsbeispiel.

Mikrodrehmaschine

Ein Beispiel für den eigenen Aufbau einer Bearbeitungseinrichtung stellt die Mikrodrehmaschine dar. Während zur Reduktion unerwünschter Schwingungen häufig große Massen (z. B. Granitplatten) verwendet werden, wird bei dem neuen Konzept versucht, mit kleinen Abmaßen auszukommen. Bei einer Positioniergenauigkeit von 0,1 µm und Spindeldrehzahlen von bis zu 60 000 ergibt sich noch ein weiterer Vorteil. Die komplette Bearbeitungsmaschine lässt sich für Grundlagenuntersuchungen in ein Rasterelektronenmikroskop integrieren. So lassen sich die Bearbeitungsprozesse bei der Mikrozerspanung sehr gut beobachten und damit weitere Optimierungen gezielt durchführen. In Bild 7 ist ein Blockbild zur Mikrodrehmaschine dargestellt.

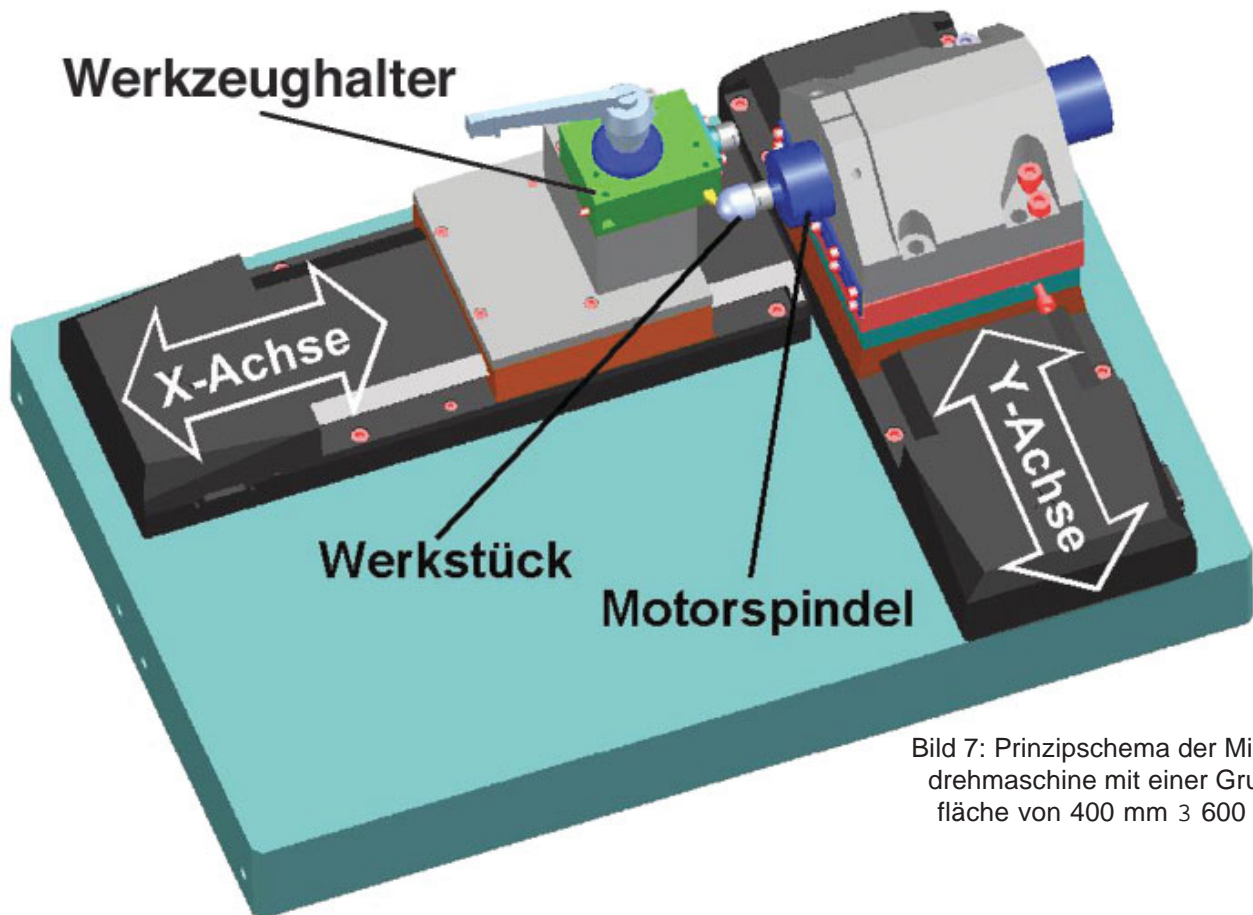


Bild 7: Prinzipschema der Mikrodrehmaschine mit einer Grundfläche von 400 mm \times 600 mm

In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

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

Grundlagen der Metrologie

Messung der thermischen Ausdehnung mit sub-nm-Unsicherheit

Mit dem verbesserten Präzisionsinterferometer können Längenänderungen im sub-nm-Bereich an Proben von bis zu 400 mm Länge gemessen werden. Von besonderem Interesse sind diese Messmöglichkeiten zur Charakterisierung der Eigenschaften von High-Tech-Materialien mit extrem geringer thermischer Ausdehnung.

Heterostrukturnormale zur lateralen Kalibrierung von Rastersondenmikroskopen

Die Herstellung von neuen Heterostrukturnormalen mit Teilungsperiodenlängen von unter 100 nm für die Kalibrierung höchstauflösender Mikroskope wurde mit Verfahren der Molekularstrahlepitaxie erprobt. Zudem erfolgte die Charakterisierung der Heterostrukturen mittels unterschiedlicher Messverfahren.

Kombination von SPM und COXI – vom Nanometer zum Millimeter

In Fortführung der Arbeiten über die Kombination von Rastersondenmikroskopen mit Röntgeninterferometern wurde ein wesentlicher Schritt hin zu Messstrecken bis in den Millimeterbereich vollzogen.

Kalibrierung von nm-Lateralnormalen mit Metrologie-REM

Zur Kalibrierung von mikrostrukturierten 2-D-Lateralnormalen mit Teilungsperioden von nur 100 nm wurde das Elektronenoptische Metrologiesystem verwendet. Hiermit ließen sich Messunsicherheiten für die mittlere Periodenlänge von weniger als 0,1 nm erzielen.

Messplatz zur diffusen Röntgenstreuung

Es wurde ein neuer Messplatz mit diffuser Röntgenstreuung realisiert, mit dem sowohl Schichtdickenbestimmungen an dünnen Schichten als auch erstmals detaillierte Aussagen über den topologischen Aufbau der sich an den Schichten ausbildenden Grenzflächen möglich sind.

Herstellung und Charakterisierung von Schichtdickennormalen für die Ellipsometrie

Neuentwickelte SiO₂/Si-Schichtdickennormale ermöglichen eine Verringerung der Messunsicherheit ellipsometrischer Schichtdickenmessungen und eine verbesserte Konsistenz der Ergebnisse mit anderen Messverfahren.

Photolumineszenzmessungen an vereinzelt Quantenpunkten bei tiefen Temperaturen

Basierend auf einem Helium-gekühlten Durchflusskryostaten wurde ein konfokales Laser-Scanning-Mikroskop mit Spektrometer aufgebaut. Mit diesem System sind bei tiefen Temperaturen räumlich aufgelöste, spektrale Untersuchungen an wenigen Quantenpunkten durchgeführt worden.

Absolutinterferometrie

Es wurde ein absolut messendes Diodenlaser-Interferometer entwickelt. Mit einem abstimmbaren Diodenlaser wird eine Auflösung von 100 µm bei Längen bis zu 5 m erreicht, welche durch ein Mehrwellenlängenverfahren weiter verbessert werden kann.

Metrologie für die Wirtschaft

Entwicklung von Mikrokräfteinsteilnormalen für Tastschnittgeräte

Zur Bestimmung der Antastkräfte von Tastschnittgeräten im µN- und mN-Bereich wurden Mikrokräfteinsteilnormale auf der Basis von Silizium-Biegebalken entwickelt und erfolgreich erprobt.

Weiterentwicklung des 3-D-Mikrotastsystems

Für den 3-D-Mikrotaster wurde eine robuste und kompakte Taster-Wechseleinrichtung entwickelt, wodurch die Handhabung des Tastsystems wesentlich vereinfacht wurde. Zudem erfolgten grundlegende Untersuchungen zur Anordnung der Messbrückenwiderstände auf der Silizium-Biegemembran.

3-D-Kalibriereinrichtung für Mikrotastsysteme

Es wurde eine 3-D-Kalibriereinrichtung zur Untersuchung der dynamischen Eigenschaften von Mikrotastern im scannenden Messbetrieb aufgebaut und erfolgreich erprobt.

Entwicklung einer laserinterferometrischen Tiefenkalibriereinrichtung für Nanoindentation-Geräte

Für Messungen der Mikro- und Nanohärte ist neben anderen Einflussgrößen auch die genaue Bestimmung der Eindringtiefe der Prüfkörper entscheidend. Für die Untersuchung der verwendeten Tiefenmesssysteme wurde eine Kalibriereinrichtung auf der Basis eines hochauflösenden Laserinterferometers realisiert.

Neues Tiefeneinstellnormal für den Bereich bis 100 µm

Durch die Entwicklung neuer diamantgedrehter Tiefeneinstellnormale von bis zu 100 µm wurde der Darstellungsbereich der Längeneinheit in der Rauheitsmessung nahezu um den Faktor 10 vergrößert.

Verbesserte Messdatenerfassung bei Winkelmessungen mit einem Ringlaser

In Zusammenarbeit mit der *Elektrotechnischen Universität St. Petersburg* wurde ein Messgerät zur inertialen Winkelmessung unter Verwendung eines Ringlasers mit einer verbesserten Elektronik zur Messdatenverarbeitung ausgerüstet, was eine weitere Verringerung der Messunsicherheit erwarten lässt.

Lichteinkopplung in das Vakuuminterferometer des Nanometerkomparators

Bei Single-Mode-Glasfasern im grünen Spektralbereich wurde im Vakuum eine irreversible Änderung der Abstrahlcharakteristik beobachtet. Der Nanometerkomparator wurde daraufhin mit Fenstern im Interferometergehäuse ausgestattet. Die Faserauskopplung an Luft erlaubt nunmehr einen stabilen Betrieb des Interferometers.

Erste Messergebnisse mit dem Nanometerkomparator an Strichmaßstäben

Nach dem Einbau von optischen Fenstern zur Strahlzuführung ist eine kontinuierliche Messfähigkeit des Interferometers am Nano-

meterkomparator erreicht worden. Vergleichsmessungen mit anderen Strichmaßkomparatoren zeigen eine Übereinstimmung der vorläufigen Messergebnisse innerhalb der Unsicherheit der Vergleichskomparatoren.

Kalibrierung von kompletten Laserinterferometern für Längenmessungen (LI)

Mit einem neuartigen Komparator können in der PTB komplette LI durch Verschiebevergleiche mit Normal-LI frei von Abbe-Fehlern in einer thermostatierten Messkammer aus Aluminium bei konstanten, aber auch variierten Temperaturen mit Korrekturen der Brechzahl der Luft und der thermischen Ausdehnung kalibriert werden. Seine Kalibrier-Messunsicherheit weist einen internationalen Spitzenwert auf.

Zweifarben-Interferometrie zur Kompensation der Luftbrechzahl

Durch Verwendung von zwei Wellenlängen in einem Interferometer lässt sich der Brechungsindex der Luft bestimmen und kompensieren. Mit einer Kombination aus einem HeNe-Laser und einem Rb-stabilisierten Diodenlaser wurden solche Längenmessungen durchgeführt.

Tastkugelabnutzung bei Maß- und Formkalibrierungen in einer Aufspannung

Der bei bestimmten metallischen Prüflingen hohe Tastkugelabrieb bei mechanisch antastend durchgeführten Formkalibrierungen beeinflusst die Maßkalibrierung, wenn diese mit der gleichen Tastkugel in einer Aufspannung durchgeführt wird.

Konstruktion eines 2-D-Messtasters für das Formmessgerät MFU8

Ein wichtiger Aspekt bei der Konstruktion war die spielfreie Lagerung mittels Festkörpergelenken, wodurch eine präzise Auslenkung bei geringsten Kräften möglich wurde.

Rückführung von Konturmessungen

Die Rückführung und Vergleichbarkeit der Messergebnisse von Konturmessgeräten wurde in einem Verbundprojekt von PTB und den europäischen Herstellern dieser Geräte erstmals sichergestellt.

Computertomographie für die dimensionelle Messtechnik

In einem Forschungsprojekt mit Industriebeteiligung werden Computertomographen für den Einsatz in der dimensionellen Messtechnik untersucht. Ziel ist es, die Rückführung solcher Messungen zu gewährleisten und Verfahren zur Überwachung der messtechnischen Eigenschaften der Geräte zu entwickeln.

Aufbau einer Messeinrichtung für die Kalibrierung von Verzahnungen

Um die Messunsicherheiten bei der Kalibrierung von Verzahnungsnormalen deutlich zu senken, wird zurzeit eine neue Messeinrichtung aufgebaut. Sie besteht aus einem hochgenauen Koordinatenmessgerät, einem Drehtisch und einer neuartigen Lasermetrologie.

Entwicklung eines Dünnschichtkraftaufnehmers

Eine photolithographisch strukturierte und mittels Sputtertechnik abgeschiedene 5-lagige dünne Schicht wurde als Kraftsensor auf einer Stahlwelle bis zu einer Pressung von ca. 1000 N/mm² verwendet.

Metrologie für die Gesellschaft

Vorrichtung zur Zulassungsprüfung von Fahrtenschreiberprüfgeräten

Für die Prüfung im Rahmen der Zulassung von Messgeräten zur Abnahme von Fahrtenschreibern (Fahrtenschreiberprüfgeräten) wurde im *Wissenschaftlichen Gerätebau* eine transportable Vorrichtung konstruiert und gefertigt.

Internationale Angelegenheiten

Erster Maßvergleich auf dem Gebiet der Härte im Rahmen von EA erfolgreich abgeschlossen

Auf Europäischer Ebene wurde ein Maßvergleich zwischen akkreditierten Messlaboratorien für die Rockwell-Härteskala erfolgreich abgeschlossen. Es konnte gezeigt werden, dass die Abweichungen der Messergebnisse aller Teilnehmer bei Verwendung eines gemeinsamen Eindringkörpers am geringsten waren.

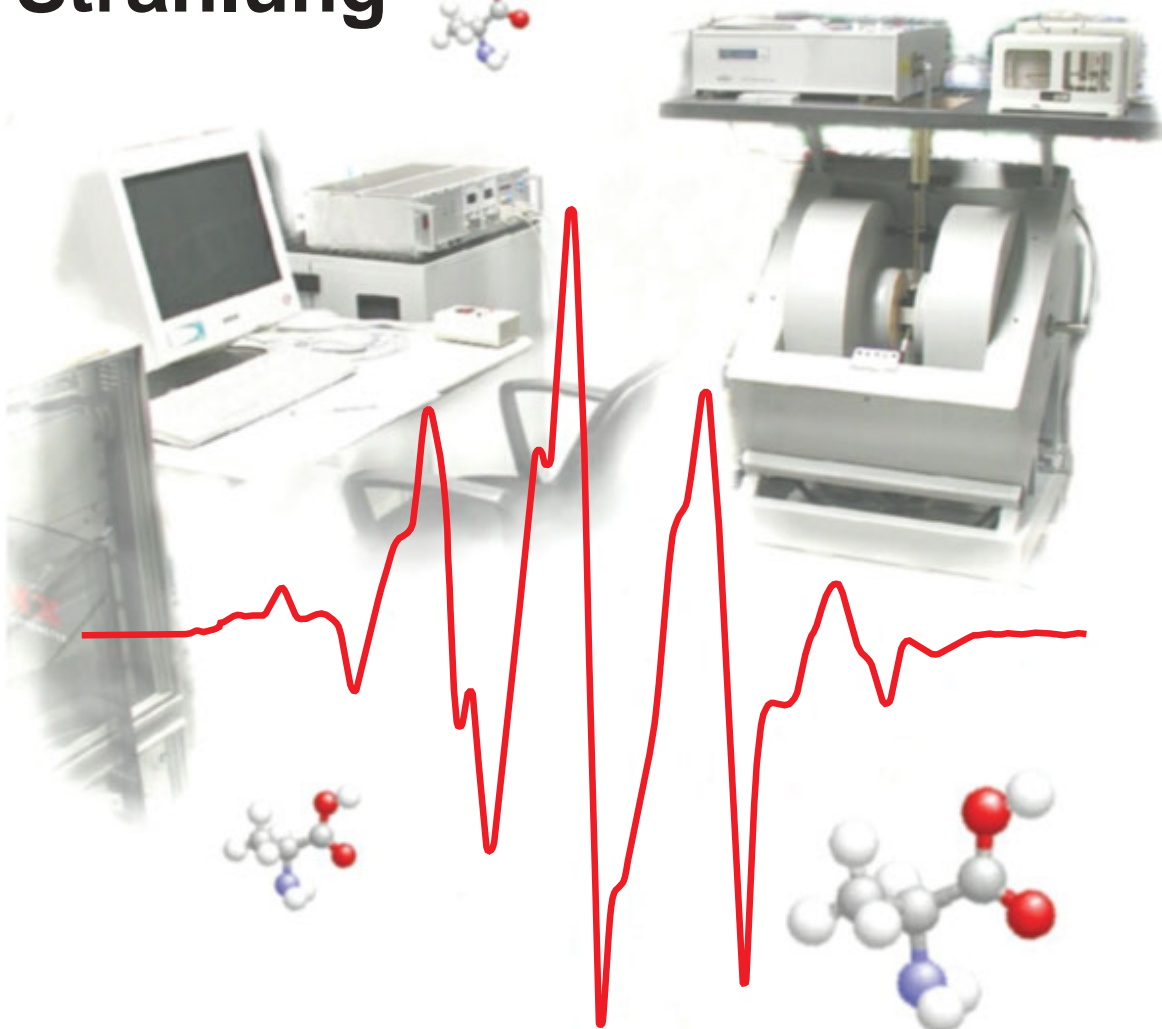
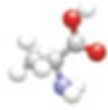
Lieferung von hochwertigen Lochplatten-Bezugsnormalen an Japan und Australien

Für die Staatsinstitute in Japan und Australien sind in der PTB Bezugsnormale für die Kalibrierung ihrer Koordinatenmessgeräte gefertigt worden. Sie bestehen aus monolithischem Zerodur mit hochgenau bearbeiteten Referenzbohrungen, die durch ein eigens entwickeltes Verfahren bearbeitet wurden.

Rekonstruktion durch morphologische Filter

Morphologische Filterverfahren zur Rekonstruktion von Oberflächentopografien finden Eingang in die internationale Normung. Das vom ISO/TC 213 „Geometrische Produktspezifikation und -verifikation“ erarbeitete Dokument ISO/TS 16 610 enthält Festlegungen zu morphologischen Operationen und Filterverfahren.

Ionisierende Strahlung



Berichte der Abteilungen

Abteilung

6

Ionisierende

Die *Abteilung 6* hat den Auftrag, Fortschritt und Zuverlässigkeit in der Messtechnik der ionisierenden Strahlung für Gesellschaft, Wirtschaft und Wissenschaft zu gewährleisten. Die Kunden kommen dabei überwiegend aus den Bereichen der Medizintechnik und des Strahlenschutzes. Die Hauptarbeitsgebiete der Abteilung lassen sich charakterisieren durch die Darstellung und Weitergabe der Einheiten für die Aktivität und Teilchenfluenz sowie für verschiedene Dosisgrößen, die Umweltradioaktivität und -dosimetrie, die Dosimetrie für die Strahlentherapie und Diagnostik, die Orts- und Personendosimetrie im Strahlenschutz sowie die Neutronenmetrologie.

Solide und kontinuierliche Arbeit an der „Basis“ schafft die Voraussetzung für die messtechnische Kompetenz in der Abteilung. Ein Grundpfeiler für die erfolgreiche Arbeit ist eine gute apparative Ausstattung. Dazu gehört insbesondere die Bereithaltung und Entwicklung von Referenzfeldern ionisierender Strahlung und der zugehörigen messtechnischen Infrastruktur. Für die Erzeugung der Referenzfelder werden Ionen- und Elektronenbeschleuniger, Röntgenanlagen und Radionuklidquellen verwendet, die regelmäßig gewartet bzw. erneuert und kalibriert werden müssen. Als Richtwerte für die Lebensdauer der Beschleuniger können 25 bis 40 Jahre, für die der Röntgenanlagen zehn bis 15 Jahre angenommen werden. Alle rechnergesteuerten Messstände müssen in der Regel nach etwa zehn Jahren erneuert werden. Daraus resultiert, dass ein erheblicher Teil der Ressourcen der Abteilung (etwa 38 %) zur Bereithaltung und Entwicklung der apparativen Ausstattung einschließlich der Referenzfelder verwendet werden muss.

Der Vorteil der Freisetzung von Ressourcen durch die Reduzierung von Referenzfeldern ist gegen den Verlust an messtechnischer Kompetenz auf diesem Gebiet abzuwägen. Das 6-MeV-Mikrotron wurde stillgelegt, neue Elektronenbeschleuniger sind jedoch in der Planung. Nach der grundsätzlichen Bewilligung der Haushaltsmittel im Jahr 2001 beginnt das Projekt nun konkrete Gestalt anzunehmen (Bild 1). In enger Zusammenarbeit mit dem *Staatlichen Baumanagement Braunschweig II* und der Baubetreuung der PTB wurde die „Entscheidungsgrundlage Bau“ erstellt, von der Oberfinanzdirektion Hannover genehmigt und liegt zurzeit den zuständigen Bundesministerien zur Begutachtung vor. Als nächste Schritte bis zum Beginn der eigentlichen Bauphase stehen die endgültige Festlegung der Beschleunigerspezifikationen sowie die Erarbeitung detaillierter Ausschreibungsunterlagen sowohl für den Beschleuniger als auch für das zu errichtende Gebäude an. Bei weiterem planmäßigem Fortgang des Projekts sollte die Bauphase im Frühjahr 2004 beginnen. Der Abschluss des Projekts ist für das Jahr 2007 geplant.

Der Forschungs- und Messreaktor Braunschweig (FMRB) wird in einem aufwendigen atomrechtlichen Verfahren stillgelegt und rückgebaut. Die Stilllegungs- und Abbauarbeiten sind im Jahr 2002 weitgehend zu Ende geführt worden (Bild 2). Schwerpunktmäßig wurden die aktivierten und kontaminierten Teile des biologischen Schilddes Reaktors abgebaut. Sämtliche beim Abbau angefallenen radioaktiven Abfälle wurden auf der Basis freigegebener Ablaufpläne konditioniert. Bis zur Verfügbarkeit des Endlagers werden diese Abfälle in einem dafür in der PTB eingerichteten Zwischenlager aufbewahrt. Sonstige angefallene Reststoffe wurden der uneingeschränkten Freigabe oder der Beseitigung auf einer Deponie zugeführt. Es gab keine rückbauspezifischen radiologischen Vorkommnisse. Die durch die Stilllegung des FMRB verlorengegangenen Kalibrierfelder

Titelbild
Elektronen-Spin-Resonanz-Messplatz für die
Dosimetrie mit Alanin

werden soweit wie möglich durch Felder an den Ionenbeschleunigern der PTB und am GKSS-Forschungsreaktor in Geesthacht ersetzt.

Nach der Zusammenlegung der ehemaligen Fachbereiche 6.3 (*Neutronendosimetrie*) und 6.4 (*Neutronenmetrologie*) zu einem neuen Fachbereich 6.4 (*Neutronenstrahlung*) zum 1. Januar 2000 wurde geplant, den Chadwick-Bau aufzustocken, um alle Mitarbeiter des Fachbereichs in einem Gebäude zusammenzuführen. Nach nur neunmonatiger Umbauzeit konnte der Umzug im April 2002 stattfinden. Dem Staatshochbauamt II gebührt Dank für die gute Zusammenarbeit bei der Planung und für die zügige Durchführung der Baumaßnahme.

Im Folgenden wird auf die Arbeiten in den z. T. eng miteinander verzahnten „Geschäftsbereichen“ der PTB „Grundlagen der Metrologie“, „Metrologie für die Gesellschaft“ und „Internationale Angelegenheiten“ eingegangen. Weitere Informationen findet man in den Schlagzeilen, die auf Berichte im Internet hinweisen.

Grundlagen der Metrologie

In diesem Aufgabenbereich erfolgen die Darstellung, Bewahrung und Weitergabe der SI-Einheiten für Aktivität, Dosis und Fluenz. Hier werden die Primär- und Transfernormale entwickelt und bereitgestellt, die den heutigen und für die Zukunft absehbaren Anforderungen genügen.

Das Radionuklid-Laboratorium der PTB wurde auch im vergangenen Jahr intensiv für die Herstellung von Aktivitätsnormalen einer Reihe von Radionukliden genutzt, mit denen die Aktivitätseinheit dargestellt und an interessierte Anwender weitergegeben wird. Ein Schwerpunkt der Arbeiten liegt deshalb bei der Entwicklung von Messmethoden für die Darstellung der Aktivitätseinheit. Messungen an alphastrahlenden Radionukliden erfolgen auch durch Zählung von Alphateilchen unter definiertem Raumwinkel in einem Halbleiterspektrometer. Den Hauptbeitrag zur Messunsicherheit lieferte bisher die Unkenntnis der räumlichen Verteilung der radioaktiven Substanz auf einer Quelle. Mit einem digitalen Autoradiographiesystem können heute die relativen Verteilungen auf den Quellenoberflächen mit einem räumlichen Auflösungsvermögen von etwa 50 µm experimentell quantifiziert werden. Die Ergebnisse werden in einem Monte-Carlo-Programm zur Berechnung des Raumwinkels des Quellspektrometer-Systems genutzt. Auf diese Weise können relative Standardmessunsicherheiten von etwa 0,5 % erreicht werden.

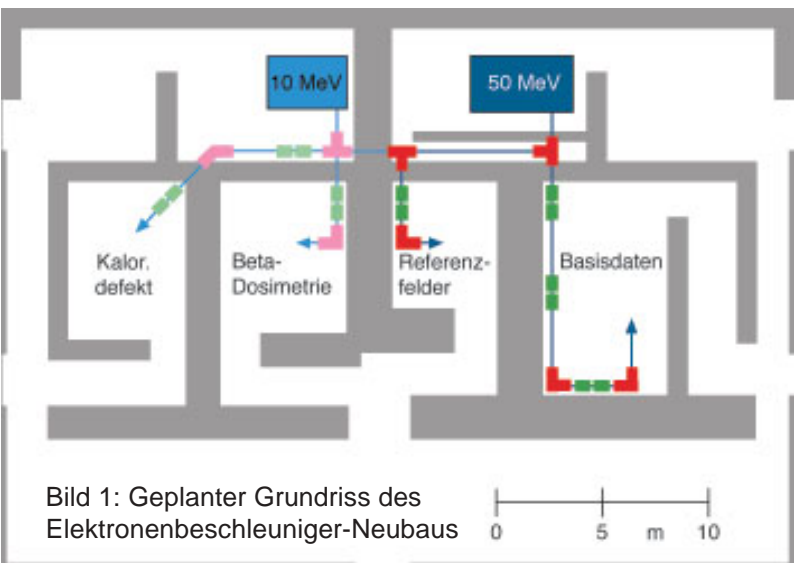


Bild 1: Geplanter Grundriss des Elektronenbeschleuniger-Neubaus

Bild 2: Abbauarbeiten am FMRB im Oktober 2002.
Im Hintergrund: Reststruktur des Reaktorkörpers nach Abbau der aktivierten und kontaminierten Bereiche des biologischen Schilds.
Im Vordergrund: voraussichtlich freigebbare Reststoffe aus dem Abbau, z. B. rechts Blei aus der thermischen Säule und den Strahlrohrnischen des Reaktors.
Hinten rechts: Zum Abtransport in das Zwischenlager bereitstehende Abfallgebinde, zum Teil mit Betonsteinen abgeschirmt.
Mitte: ehemalige Transportflasche für Brennelemente



Die Referenzstrahlungsfelder der PTB für Neutronen wurden in diesem Jahr wieder intensiv für Bestrahlungen im Auftrag von in- und ausländischen Gästen im Rahmen gemeinsamer Forschungsprojekte und für eigene Arbeiten genutzt. Nach Abschaltung des FMRB Ende 1995 steht der PTB nun wieder ein Kalibrierfeld mit einer thermischen Neutronenenergieverteilung zur Verfügung. In Zusammenarbeit mit Q.203 wurde der Neutronenstrahl an einem Neutronenleiter des GKSS-Forschungsreaktors in Geesthacht charakterisiert. Die spektrale Fluenz wird mittels Flugzeitmessung hinter einem mechanischen Strahlmodulator bestimmt und bleibt nahezu unverändert, wenn der Neutronenstrom um bis zu einem Faktor 20 mit der Eingangsblende des Neutronenleiters variiert wird.

Die Anforderungen an die Messtechnik für ionisierende Strahlung basieren auf der Kenntnis und Beurteilung von Wechselwirkungsmechanismen zwischen ionisierender Strahlung und Materie, insbesondere den Bausteinen biologischer Systeme. Von besonderem Interesse ist hierbei die als Folge der Wechselwirkungsprozesse auftretende Spurstruktur der ionisierenden Strahlung, die in Verbindung mit den Mikro- bzw. Nanometerstrukturen der biologischen Zelle insbesondere im Bereich der Chromosomen und der DNS-Moleküle den Anlass für Strahlenschädigungen geben. Es ist damit zu rechnen, dass sich mittelfristig grundlegend neue Perspektiven für die Strahlenmetrologie eröffnen werden. Zwei Forschungsschwerpunkte könnten der Abteilung neue Horizonte erschließen:

Zum einen ist der in den letzten Jahren aufgebaute Mikro-Ionenstrahl-Messplatz zur Einzelteilchenbestrahlung von Proben im Mikrometerbereich (z. B. von Zellkernen oder Halbleiterstrukturen) in Betrieb gegangen. Die Positionierung des Strahls und der zu untersuchenden Proben wurde derart optimiert, dass in einer Stunde ca. 500 bis 1000 Positionen einer Probe angefahren und mit einer Genauigkeit von ca. 2 μm mit einer wählbaren Anzahl von Ionen bestrahlt werden können. Erste Experimente wurden mit Radiobiologen der *Universitäten Göttingen* und *Dresden* durchgeführt.

Zum anderen ist die Berechnung der Erzeugung von Ionisationsclustern in nanometrischen Targets und die Anwendung der Ergeb-

nisse auf messtechnische Konzepte von Bedeutung. In internationaler Zusammenarbeit (*Legnaro National Laboratories* und *Universität Padua*, Italien; *Soltan Institute of Nuclear Studies*, Polen; *The Weizmann Institute of Sciences*, Israel; *Loma Linda Medical Center*, USA) wird die Erzeugung von Ionisationsclustern in nanometrischen Volumina experimentell untersucht. Für die auf die experimentellen Gegebenheiten angepassten Monte-Carlo-Rechenverfahren ist aber die umfassende Kenntnis aller Wechselwirkungsprozesse notwendig, die für den Aufbau von Spurstrukturen wesentlich sind. So gehört zu den Aufgaben der Abteilung auch die präzise Messung atomarer oder molekularer Wirkungsquerschnitte für niederenergetische Elektronen, da diese als Sekundärteilchen bei allen Strahlenarten in großer Anzahl auftreten und zu deren Spurstrukturen beitragen. Die Verbindung zwischen Nanodosimetrie und traditioneller Dosimetrie erfolgt über den W-Wert (mittlere Energie zur Erzeugung von Ladungsträgerpaaren) durch Vergleich der Ionisationscluster-Erzeugung in nanometrischen Volumina mit der bei vollständiger Teilchenabbremung. In Präzisionsmessungen wurde zum ersten Mal direkt nachgewiesen, dass der Elektronen-W-Wert für trockene Luft bei 8 keV einen Wert von $(34,00 \pm 0,08)$ eV annimmt und oberhalb von etwa 4 keV unabhängig von der Energie ist.

Metrologie für die Gesellschaft

Von besonderer gesellschaftlicher Relevanz ist die Bereitstellung von Messtechnik und -verfahren ionisierender Strahlung, um beim Erhalt und bei der Wiederherstellung der Gesundheit der Bürger Hilfe zu leisten; andererseits dient aber auch die Bereitstellung von Messtechnik und -verfahren dem Schutz vor den schädigenden Wirkungen ionisierender Strahlung.

Zur Steigerung des Heilungserfolgs bei strahlentherapeutischen Maßnahmen wird in zunehmendem Umfang die so genannte „Intensity Modulated Radiation Therapy“ (IMRT) eingesetzt. Bei dieser Behandlungsmethode wird das Karzinom aus unterschiedlichen Richtungen mit gegebenenfalls recht kompliziert geformten Feldern unterschiedlicher Intensität bestrahlt. Die dabei auftretenden Bestrahlungsbedingungen unterscheiden sich z. T. ganz erheblich von den bei der Darstel-

lung und Weitergabe der Einheit der Wasser-Energiedosis vorliegenden Referenzbedingungen. Um auch für solche Bestrahlungsbedingungen eine möglichst präzise Bestimmung der Wasser-Energiedosis zu ermöglichen, wird eine Sekundärnormal-Messeinrichtung auf Basis der Elektronen-Spin-Resonanz(ESR)-Spektrometrie mit Alanin als Sondenmaterial aufgebaut.

Das Messprinzip beruht auf dem Nachweis strahlungsinduzierter freier Radikale im Alanin mittels ESR. Als Maß für die Dosis dient die massenbezogene ESR-Amplitude; im therapeutisch relevanten Dosisbereich von etwa 1 Gy bis 10 Gy wird eine relative Standardmessunsicherheit unterhalb von 0,5 % angestrebt. Vorteile des Messverfahrens liegen in der geringen Ausdehnung der zylindrischen Sonden aus Alanin mit einem Volumen von nur wenigen mm³ und im Erhalt der Dosisinformation über lange Zeiträume.

Der im Aufbau befindliche Messplatz besteht aus einem rechnergesteuerten ESR-Spektrometer und einem hochempfindlichen Resonator, der mit einer in der PTB gefertigten Positioniervorrichtung für Alanin-Dosimetersonden ausgerüstet wurde. Nach der Installation des Spektrometers Ende 2001 wurden umfangreiche Untersuchungen zur Optimierung der Spektrometer-Grundeinstellungen durchgeführt. Dazu gehören Untersuchungen zum Einfluss äußerer klimatischer Bedingungen auf die Stabilität der ESR-Amplitude von bestrahlten Alanin-Sonden. Um die angestrebten Messunsicherheiten zu erzielen, wird gegenwärtig eine Referenzprobe entwickelt, mit deren Hilfe ein Großteil der apparativen Einflüsse des Spektrometers auf die ESR-Amplitude eliminiert werden kann.

Vom Bundesumweltministerium wurde in den zurückliegenden zwei Jahren ein Projekt zum Aufbau eines Messsystems für Thoron und Thoron-Folgeprodukte (Bild 3) gefördert. Dieses Projekt wurde inzwischen erfolgreich mit der Erzeugung von Thoron-Referenzatmosphären abgeschlossen, die rückführbar auf die nationalen Normale der PTB sind. Kalibrierungen von Thoron-Messgeräten in der Messgröße Thoron-Aktivitätskonzentration im Bereich von 1 kBq/m³ bis 10 kBq/m³ sind ab sofort mit relativen Standardmessunsicherheiten von kleiner als 5 % möglich.

Für die in der neuen Strahlenschutz- und Röntgenverordnung eingeführten phantombezogenen Strahlenschutz-Messgrößen hat die PTB bereits 16 Ortsdosimeter und zwölf Personendosimeter für Photonenstrahlung zugelassen. Damit ist sichergestellt, dass geeignete Dosimeter zur Umsetzung dieser Verordnungen zur Verfügung stehen. Bei der Umsetzung der genannten Verordnungen wurde die geforderte untere Grenze des Messbereichs der Dosis für Ganzkörper-Personendosimeter von 0,2 mSv pro Monat auf 0,1 mSv pro Monat gesenkt. Die zurzeit in Deutschland verwendeten Ganzkörper-Personendosimeter für Photonenstrahlung wurden zum großen Teil bei der Bauartprüfung nur bis zu der alten unteren Dosisgrenze von 0,2 mSv geprüft. Im Rahmen der regelmäßigen jährlichen Vergleichsmessungen für Photonen-Personendosimeter wurde deshalb überprüft, ob die Dosimeter technisch in der Lage sind, auch kleinere Dosen zwischen 0,1 mSv und 0,2 mSv unter Einhaltung der geforderten Anforderungen zu messen. Die Ergebnisse belegen, dass dies ohne Einschränkungen möglich ist.

Die Experimente zur Bestimmung der radiobiologischen Wirksamkeit von Neutronen bei niedrigen Dosen wurden in Zusammenarbeit mit der GSF und den *Universitäten Göttingen* und *Münster* für verschiedene Zelllinien und Endpunkte fortgesetzt. Die Chromosomenaberrationen von Lymphozyten zeigen für Neutronen im Energiebereich zwischen 30 keV und 1,2 MeV die erwartete starke Energieabhängigkeit mit einem Maximum bei einer Neutronenenergie von etwa 200 keV. Die Mutationsraten des menschlichen Chromosoms #11, das an Hamsterzellen angelagert bestrahlt wurde, zeigen eine ähnliche Abhängigkeit von der Neutronenenergie. Für eine abschließende Bewertung fehlen noch Untersuchungen bei Neutronenenergien unterhalb 565 keV.

Internationale Angelegenheiten

Internationale Schlüsselvergleiche des BIPM sind eine wesentliche Grundlage des „Mutual Recognition Arrangement“ der Meterkonvention zwischen metrologischen Staatseinstituten. Für schnelle und zuverlässige internationale Vergleichsmessungen an gammastrahlenden Radionukliden existiert am BIPM seit 1976 ein Ionisationskammer-

Messsystem (SIR), zu dem interessierte nationale Metrologie-Institute Ampullen mit Lösungen einsenden können. Inzwischen liegen über 800 Ergebnisse für 62 verschiedene Radionuklide vor, die systematisch für die Datenbank beim BIPM zu Schlüsselvergleichen aufbereitet werden sollen. Zu diesem Zweck wurden in einer Arbeitsgruppe die Algorithmen für die Auswertung, insbesondere aber die Frage der Verwendbarkeit von Daten, die älter als zehn Jahre sind, oder von Instituten, die heute nicht mehr existieren, diskutiert. Einige so genannte „Draft-B-Berichte“ liegen mittlerweile vor. Darüber hinaus wurden im Berichtszeitraum sechs neue Vergleichsmessungen vom BIPM an radioaktiven Lösungen der Nuklide ^{32}P , ^{54}Mn , ^{65}Zn , ^{192}Ir , ^{204}Tl und ^{241}Am initiiert, an denen auch die PTB teilnimmt. Bemerkenswert ist, dass mit ^{32}P , ^{192}Ir und ^{204}Tl ein Schwerpunkt bei Anwendungen aus dem medizinischen Bereich gelegt worden ist.

Im Rahmen der Qualitätssicherung in der Radonmesstechnik wurde ein internationaler Ringvergleich von der PTB federführend durchgeführt. Durch die Kalibrierung eines

Radonmonitors in den Referenzfeldern der jeweils teilnehmenden Kalibriereinrichtungen werden die Kalibrierfaktoren und deren Unsicherheiten verglichen. Neun Institute aus sieben Ländern nahmen in den Jahren 2001/2002 teil. Die Fortsetzung dieses Ringvergleichs wird in den nächsten Jahren im Rahmen eines EUROMET-Projekts stattfinden.

Im Mai 2002 wurde ein Kooperationsvertrag mit dem *Henryk Niewodniczanski Institute for Nuclear Physics in Krakau* und dem *National Radiological Protection Institute in Prag* abgeschlossen, um die Ursachen unerwartet hoher Aktivitätsverhältnisse von ^{238}Pu und $^{(239+240)}\text{Pu}$ in einigen Luftstaubproben von Standorten in Zentraleuropa zu klären. Dazu sollen sowohl die laufenden Routineproben aus den nationalen Überwachungsprogrammen regelmäßig miteinander verglichen werden als auch noch vorhandenen Aerosolproben aus den letzten zehn bis 20 Jahren von insgesamt sechs zentraleuropäischen Orten rückblickend analysiert werden.

Die Referenzmessfläche zur Messung der Dosisbeiträge der unterschiedlichen Komponenten der natürlichen Umgebungstrahlung ist seit Beginn des Jahres im Dauerbetrieb. Diese Messfläche wurde zusammen mit anderen Messplätzen in das internationale Vergleichsprogramm von Dosimetriesystemen europäischer Frühwarnsystembetreiber mit einbezogen, das in diesem Jahr im Rahmen der *European Radiation Dosimetry Group (EURADOS)* von der PTB durchgeführt wurde (Bild 4). Ziel des Programms ist es, eine Harmonisierung der Umgebungsüberwachung und eine einheitlichen Interpretation der Messdaten in den verschiedenen Ländern zu erreichen.

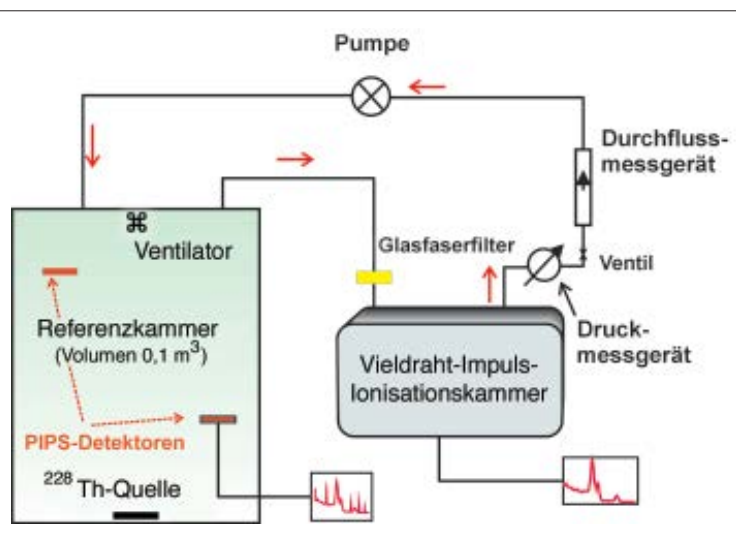


Bild 3: Aufbau des Thoron-Referenzmesssystems

Bild 4: Teilnehmer an der EURADOS-Vergleichsmessung mit ihren Messgeräten auf dem PTB-Gelände. Die Messgeräte wurden kreisförmig um Kalibrierquellen der Radionuklide ^{137}Cs , ^{60}Co und ^{226}Ra aufgebaut.



In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

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

Grundlagen der Metrologie

Energieabhängigkeit des W-Wertes von Elektronen in trockener Luft

Oberhalb von 4 keV ist der W-Wert von Elektronen in trockener Luft unabhängig von der Teilchenenergie.

Simulation eines hochauflösenden Elektronen-Monochromator/Spektrometersystems zur Messung von Elektronen-Wechselwirkungsquerschnitten

Neues Elektronen-Spektrometerkonzept macht generalisierte Oszillatorstärken experimentell zugänglich.

Messung totaler Elektronen-Streuquerschnitte von He im Energiebereich zwischen 4 eV und 2 keV

Diskrepanzen zwischen Theorie und Experiment aufgeklärt: Die Absolutbestimmung der totalen Elektronen-Streuquerschnitte von He ergab eine gute Übereinstimmung mit theoretischen Rechnungen. Die bisher existierenden Diskrepanzen oberhalb von 600 eV können durch eine unzureichende Berücksichtigung der Elektronen-Vorwärtsstreuung bei früheren Experimenten erklärt werden.

Monte-Carlo-Programm zur Berechnung des Transfers der energiespezifischen Kalibrierkurve bei gammaspektrometrischen Messungen

In Zusammenarbeit mit der *Universität Bukarest* wurde das Monte-Carlo-Programm GESPECOR zur Berechnung von Transferfaktoren weiterentwickelt. Damit ist es möglich, die gammaspektrometrische Bestimmung der spezifischen Aktivität an Proben mit einer nicht experimentell kalibrierten Geometrie unter Berücksichtigung der Selbstabsorption und der Koinzidensummutation mit kleinen Unsicherheiten durchzuführen.

Verbesserung der Primärnormal-Messeinrichtung für die Wasser-Energiedosis bei Röntgenstrahlung

Durch die Berücksichtigung von Auger-Elektronen wurde das Auswertungsverfahren zur Bestimmung der Wasser-Energiedosis aus Messungen mit einer Graphit-Extrapolationskammer verbessert. Dadurch kann die Normal-Messeinrichtung jetzt für Röntgenstrahlung

ab 50 kV anstelle von früher 100 kV eingesetzt werden.

Vergleich des berechneten und gemessenen Ansprechvermögens von Graphit-Hohlraum-Ionisationskammern bei Röntgenstrahlung mit Erzeugerspannungen unterhalb von 300 kV

Aus einem Vergleich des berechneten und gemessenen Luftkerma-Ansprechvermögens von drei unterschiedlichen Graphit-Hohlraum-Ionisationskammern konnten wertvolle Hinweise für die Weiterentwicklung von Monte-Carlo-Verfahren bezüglich des Transports niederenergetischer Photonen (10 keV bis 50 keV) gewonnen werden.

Charakterisierung der Referenzfelder an den neuen Röntgenanlagen im Fachbereich 6.2

An drei neuen Röntgenanlagen wurden etwa 90 Referenzfelder für Röntgenstrahlung neu charakterisiert. Schon nach etwa drei Monaten nach der Inbetriebnahme konnte der routinemäßige Kalibrierbetrieb an den neuen Anlagen wieder aufgenommen werden.

Spektrale Untersuchungen des strahlungsinduzierten Lichtsignals in Plastikszintillatoren

Die Emissionsspektren von in der Dosimetrie gebräuchlichen Szintillatormaterialien wurden untersucht. Die Ergebnisse sind für die Dosimetrie in der intravaskulären und der Augentumor-Brachytherapie von Bedeutung.

Charakterisierung des thermischen Neutronenkalibrierfelds am GKSS-Forschungsreaktor

An einem Neutronenleiter des GKSS-Forschungsreaktors in Geesthacht hat die PTB ein Kalibrierfeld mit thermischen Neutronen etabliert. Die spektrale Fluenz, die unabhängig von dem in einem weiten Bereich variablen Neutronenstrom ist, wird regelmäßig durch Flugzeitspektrometrie überprüft.

Bestimmung differentieller Neutronen-Streuquerschnitte an Stickstoff

Die Streuung schneller Neutronen (8 MeV bis 14 MeV) wurde an Silizium-Nitrid-Proben untersucht. Nach Vorgabe der unter gleichen

Bedingungen gemessenen Wirkungsquerschnitte für Silizium konnten auch die Wirkungsquerschnitte für die elastische und inelastische Streuung an Stickstoff bestimmt werden.

Resonanzradiographie mit schnellen Neutronen

Es wurde eine neue Messmethode erfolgreich erprobt, die es ermöglicht, mit schnellen Neutronen aus der hochintensiven (Be+d)-Neutronenquelle der PTB zerstörungsfreie radiographische Untersuchungen an Materialien durchzuführen, die überwiegend leichte Elemente enthalten, z. B. H, C, N und O.

Bestimmung des kalorischen Defekts in Wasser für hochenergetische Protonen, Deutronen, ^4He - und ^{12}C -Ionen

Totalabsorptionsexperimente zur Bestimmung der Energiedeposition von Ionen verschiedener Sorten und Energien in Wasser zeigen, dass der kalorische Defekt für alle Ionen systematisch mit dem Verhältnis von Energie und Reichweite der Ionen ansteigt. Auf der Basis dieser Ergebnisse können Messungen der Wasser-Energiedosis für Ionen und Neutronen dann korrigiert werden, wenn das mittlere LET der (Sekundär)-Ionen bekannt ist.

Charakterisierung dünner Schichten mittels resonanter Kernreaktionen

Die scharfe Resonanz der Kernreaktion $^7\text{Li}(\alpha, \text{g})^{11}\text{B}$ bei $E_\alpha = 814 \text{ keV}$ wird ausgenutzt, um die Eigenschaften von dünnen Li-, LiOH- oder LiF-Targets zu bestimmen.

Metrologie für die Wirtschaft

Das Beta-Sekundärnormal BSS 2 mit bereits 18 Exemplaren weltweit im Einsatz – ein Beispiel für erfolgreichen Industrietransfer

Das Beta-Sekundärnormal BSS 2 ist in der PTB in enger Zusammenarbeit mit der Industrie entwickelt worden und wird seit 1997 in Lizenz gebaut und vertrieben. Es sind bereits 18 Normale kalibriert worden. Zwei Normale sind nach der Kalibrierung in der PTB an Nutzer in den USA ausgeliefert und auch beim NIST mit der dortigen Primärnormalmesseinrichtung verglichen worden. Die ermittelten Kalibrierwerte stimmen mit denen der PTB um besser als 2 % überein.

Metrologie für die Gesellschaft

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

Das vom Bundesumweltministerium geförderte Projekt zum Aufbau einer Thoron-Referenzkammer wurde erfolgreich mit der Erzeugung von Thoron-Referenzatmosphären rückführbar auf die nationalen Normale abgeschlossen. Ab sofort sind Kalibrierungen von Thoron-Messgeräten in der Messgröße Thoron-Aktivitätskonzentration im Bereich von 1 kBq/m^3 bis 10 kBq/m^3 mit relativen Standard-Messunsicherheiten kleiner als 5 % möglich.

Eine Präzisierung der Norm DIN 6800-2 zur Dosisermittlung in hochenergetischen Elektronenstrahlungsfeldern

Unter Mitwirkung der PTB wurde die Norm DIN 6800-2 präzisiert. Während bisher die Eingangsdaten auf verschiedenen Wegen etwa über Tabellen oder Diagramme in die Bestimmung der Dosis eingingen, wurden in einer Berichtigung der Norm die einzelnen Schritte jetzt in eindeutiger Weise festgelegt.

Höhere Wiederholgenauigkeit bei der Dosimetrie mit Alanin und ESR durch Relativmessverfahren

Eine Sekundärnormal-Messeinrichtung für die Darstellung der Einheit der Wasser-Energiedosis in Strahlungsfeldern hoher Energie befindet sich im Aufbau. Durch ein Relativmessverfahren, bei welchem das ESR-Spektrum der Alanin-Dosimetersonden gleichzeitig mit dem einer Referenzsubstanz erfasst wird, konnte die Messunsicherheit auf etwa $1/7$ verringert werden.

Erste Ergebnisse zur Dosimetrie der Umgebungsstrahlung auf dem Freiluft-Referenzmessplatz der PTB

Auf dem Gelände der PTB in Braunschweig wurde eine Referenzmessfläche geschaffen, auf der die Dosisbeiträge der unterschiedlichen Komponenten der natürlichen Umgebungsstrahlung untersucht werden; dies sind terrestrische Strahlung (Gamma-Strahlung) und Höhenstrahlung (Myonen, Elektronen, Neutronen, Gamma-Strahlung). Die Messfläche ist seit Beginn des Jahres im Dauerbetrieb.

Vergleichsmessung an Dosisleistungsmesssystemen nationaler Frühwarnsysteme für die Umgebungsüberwachung

Im Rahmen der European Radiation Dosimetry Group (EURADOS) wurde das im Jahr 1999 begonnene Vergleichsprogramm von Dosimetriesystemen europäischer Frühwarnsystembetreiber im Jahr 2002 durch einen zweiten Messzyklus fortgeführt. Mit insgesamt zwölf Teilnehmern ist damit ein umfassender Vergleich der Frühwarnsysteme der europäischen Gemeinschaft möglich geworden.

Amtliche Photonen-Personendosimeter können auch 0,1 mSv pro Monat messen

Die zurzeit in Deutschland zugelassenen und verwendeten Ganzkörper-Personendosimeter für Photonenstrahlung können auch bis zu einer unteren Dosisgrenze von 0,1 mSv pro Monat herab verwendet werden.

Messungen der relativen biologischen Wirksamkeit von Neutronen für ein menschliches Chromosom

In Zusammenarbeit mit dem *Institut für Strahlenbiologie der Universität Münster* wurde die Mutationsrate des menschlichen Chromosoms #11 bei Einwirkung von Röntgenstrahlung und Neutronen untersucht und die relative radiobiologische Wirksamkeit von Neutronen in Abhängigkeit von ihrer Energie bestimmt.

Energieabhängigkeit des Tiefen-Personendosis-Ansprechvermögens von elektronischen Personendosimetern für Neutronenstrahlung

Die Untersuchung des Tiefen-Personendosis-Ansprechvermögens von aktiven Personendosimetern in den Referenzstrahlungsfeldern der PTB hat gezeigt, dass verschiedene kommerziell angebotene Dosimeter und einige neuere Laborentwicklungen teilweise für die praktische Anwendung an Arbeitsplätzen zufriedenstellende Eigenschaften aufweisen.

Mikro-Ionenstrahl für radiobiologische Experimente

Die Lage des Mikro-Ionenstrahls und die Positionierung der zu untersuchenden Proben konnte derart optimiert werden, dass im Routinebetrieb Bestrahlungen mit abzählbaren Ionen an 500 bis 1000 Positionen pro Stunde mit einer absoluten Treffergenauigkeit von ca. 2 μm durchgeführt werden können.

Internationale Angelegenheiten

Internationaler Ringvergleich zur Darstellung der Radonaktivitätskonzentration

Von der PTB wurde ein internationaler Ringvergleich mit einem Radonmessgerät federführend durchgeführt. Neun Institute aus sieben Ländern nahmen in den Jahren 2001/2002 teil. Die Fortsetzung dieses Ringvergleichs wird 2003/2004 im Rahmen eines EUROMET-Projekts stattfinden.

Bestimmung von Plutonium-Isotopen in der bodennahen Luft in Zentraleuropa

Im Rahmen eines Kooperationsvertrags mit Instituten aus Polen und Tschechien werden Luftstaubproben aus nationalen Überwachungsprogrammen und noch vorhandene Aerosolproben aus den letzten 10 bis 20 Jahren von insgesamt sechs zentraleuropäischen Orten analysiert, um unerwartet hohe Aktivitätsverhältnisse von $^{238}\text{Pu}/(^{239+240}\text{Pu})$ in Luftstaubproben von Standorten in Zentraleuropa zu klären.

Internationaler Vergleich zur Bestimmung der spezifischen Aktivitäten in Seetang

Auf der Grundlage des „Memorandum of Understanding“ zwischen NIST und PTB/BAM beteiligt sich die PTB an der Bestimmung der Referenzwerte für die spezifischen Aktivitäten natürlicher und künstlicher Radionuklide in dem zukünftigen „Standard Reference Material“ des NIST.

Neutronenspektrometer für die Diagnostik von Plasmaexperimenten am JET in Culham

Die gute Energieauflösung, die bei der Entfaltung von mit flüssigen organischen Szintillatoren aufgenommenen Pulshöhenspektren unter Laborbedingungen erreicht wird, konnte erstmals auch an dem Plasmaexperiment JET in Culham demonstriert werden.

Trainingskurse über Entfalteverfahren in der PTB und am LANL, USA

Die langjährige Erfahrung von PTB-Mitarbeitern bei der Entwicklung von Entfalteverfahren mit unterschiedlichen Algorithmen und deren Anwendung auf vielfältige Wenig- und Vielkanaldaten wurde erstmals in zwei jeweils dreitägigen Trainingskursen in der PTB und in Los Alamos, USA, an in- und ausländische Anwender von vier Kontinenten weitergegeben.

Charakterisierung der n-TOF-Spallationsneutronenquelle des CERN

Die gut spezifizierten ^{235}U - und ^{238}U -Spaltkammern der PTB konnten in Zusammenarbeit mit dem CERN-Team erfolgreich eingesetzt werden, um die für die neue Spallationsquelle erwartete spektrale Neutronenfluenz in einem Flugzeitexperiment weitestgehend zu bestätigen.

Sonstiges

Zweifach-Präzisions-Totzeitstufe

Totzeitstufen sind bei der Darstellung der Einheit der Aktivität mittels Koinzidenzverfahren ein wichtiges Hilfsmittel. Da die kommerziell verfügbaren und bisher eingesetzten Totzeitstufen die hohen Anforderungen der PTB nicht erfüllten, wurde eine Serie besser geeigneter Totzeitstufen entwickelt und für die PTB in Serie gebaut.

Temperatur und Synchrotronstrahlung



Berichte der Abteilungen

Abteilung



Temperatur Synchrotron

Institut Berlin

Die laufenden Bauvorhaben auf dem Campus Charlottenburg – hauptsächlich auf dem bis vor kurzem noch an das *Berliner Landesamt für das Mess- und Eichwesen* vermieteten Teil – sind erkennbar vorangekommen. Der Rohbau für den zentralen Gerätebau und die Konstruktion konnte vor dem Winter fertiggestellt werden, so dass das Gebäude voraussichtlich nach Plan im kommenden Frühsommer bezogen werden kann. Die Ausführungsplanung für das neue Zentrum für die Informationstechnik steht kurz vor dem Abschluss. Mit den Bauarbeiten an der Gebäudeinfrastruktur wurde bereits begonnen; der Bezug ist für die 2. Hälfte des Jahres 2004 vorgesehen. Damit stehen die benötigten Räume für den Ausbau der metrologischen Informationstechnik, der von der Evaluationskommission empfohlen wird, rechtzeitig in Berlin zur Verfügung.

Für den Kompaktspeicherring, den die PTB am Standort von BESSY II in Berlin-Adlershof plant, wurde Ende August fristgemäß die Entscheidungsunterlage Bau gemeinsam mit der *BESSY GmbH*, der *Oberfinanzdirektion Berlin* und dem *Bundesbauamt Berlin I* fertiggestellt und das Genehmigungsverfahren eingeleitet. Die Speicherringanlage, die Ende 2007 in Betrieb gehen soll, erhält den Namen *Willy-Wien-Laboratorium* nach Wilhelm Wien (1864 bis 1928), der für seine bahnbrechenden radiometrischen Arbeiten in der *Physikalisch-Technischen Reichsanstalt* 1911 den Nobelpreis erhielt. Auch die Pläne der *BESSY GmbH* zur Errichtung eines Freie-Elektronen-Lasers für

Titelbild

Auf dem Leuchten dieses Hohlraumstrahlers bei der Temperatur erstarrenden Goldes von 1064,18 °C beruht nicht nur die Hochtemperaturskala der PTB, sondern wegen des Planckschen Strahlungsgesetzes auch die Skala der spektralen Strahldichte. Das Foto zeigt den Gold-Fixpunktstrahler des Fachlaboratoriums Temperaturstrahlung mit der zentralen Austrittsöffnung.

weiche Röntgenstrahlung sind inzwischen vom Wissenschaftsrat positiv begutachtet worden. Die endgültige Entscheidung hängt noch von dem derzeit zu erstellenden „Technical Design Report“ ab. Das weltweit einzigartige Synchrotronstrahlungszentrum in Adlershof mit dann drei sich ideal ergänzenden Strahlungsquellen ist demnach auf einem guten Wege.

Metrologie mit Synchrotronstrahlung

Im Radiometrie-Bereich der Abteilung wurden im Berichtsjahr die in den Vorjahren begonnenen Arbeiten planmäßig fortgeführt.

Das im Rahmen des BMWi-Programms „Leistungssteigerung Infrastruktur“ geförderte EUV-Reflektometer wurde im Oktober in Adlershof in Betrieb genommen. Mit ihm besitzt die PTB weltweit das einzige Instrument, mit dem Spiegel bis 55 cm Durchmesser und 50 kg Gewicht bei 13 nm „at wavelength“ mit kleinen Unsicherheiten charakterisiert werden können (Bild 1). Die PTB war außerdem an der Entwicklung eines Laborreflektometersystems zur Überwachung des Fertigungsprozesses von Optiken für die EUV-Lithographie beteiligt, das unter Federführung des *Fraunhofer-Instituts für Werkstoff- und Strahltechnik* in Dresden zusammen mit der *Carl Zeiss SMT AG* fertiggestellt wurde. Die PTB brachte ihre langjährige Erfahrung im Spektralbereich des EUV ein und charakterisierte die Quelle und den Monochromator.

Am „Micro Exposure Tool“ konnten zu Beginn des Jahres im Rahmen einer breiten Industriekooperation u. a. auch mit der *Carl Zeiss SMT AG* erstmals in Europa Halbleiterstrukturen von 50 nm Breite hergestellt werden (Bild 2). Damit wurden die technische Einsetzbarkeit von EUV-Strahlung für die Strukturierung der nächsten drei Generationen von Bauelementen und die Realisierbarkeit der „International Technology Roadmap for Semiconductors“ eindrucksvoll bestätigt.

Eine weitere Voraussetzung für die Produktion künftiger Halbleiter-Chips ist die Beherrschung und Kontrolle von Oberflächenkontaminationen. Mit der neuen Röntgenfluoreszenz-Analyse-Einrichtung der PTB konnten Spuren von wenigen Nanogramm Na, Mg und Al auf einem Silizium-Wafer nachgewiesen werden (Bild 3).

Internationale Vergleiche

Im Bereich der „klassischen“ Radiometrie, die nicht mit Synchrotronstrahlung betrieben wird, sind die Messungen zu zwei Schlüsselvergleichen der spektralen Empfindlichkeit abgeschlossen worden (CCPR-K2.a im nahen Infrarot; CCPR-K2.b im Sichtbaren) und befinden sich in unterschiedlichen Stadien der Auswertung. Für den Beginn des CCPR-K2.c im UV von 200 nm bis 400 nm im Herbst 2003, für den die Abteilung das Pilotlaboratorium stellt, wurden umfangreiche Voruntersuchungen durchgeführt. Als deren Konsequenz ist eine Verbesserung und Erweiterung der vorhandenen Messtechnik in Angriff genommen worden.

Ein am NPL neu entwickelter hochstabiler Hohlraumstrahler, der am Silber-Erstarrungspunkt bei 961,78 °C arbeitet, wurde bei zwei Wellenlängen mit dem ähnlich aufgebauten Gold-Fixpunktstrahler der PTB verglichen

und eine innerhalb der Unsicherheit der ITS-90 liegende hervorragende Übereinstimmung nachgewiesen. Hohlraumstrahler sind bekanntermaßen primäre Normale für die Darstellung sowohl der Temperaturskala als auch der strahlergestützten radiometrischen Einheiten. Ihre Weiterentwicklung ist für die PTB daher nicht nur eine historische Verpflichtung aus den Zeiten Willy Wiens, sondern gerade heute im Aufgabenprofil der Abteilung 7 ein zentrales Anliegen (siehe Titelbild).

Im Temperaturbereich von rund 1000 °C bis 3000 °C oberhalb der Metall-Erstarrungspunkte werden weltweit neue Temperatur-Fixpunkte unter Verwendung von Metall-Kohlenstoff-Eutektika entwickelt und untersucht. In Vorbereitung des EU-geförderten Projekts HIMERT, bei dem die PTB die strahlungsthermometrische Bestimmung solcher Fixpunkte und den Vergleich mit Messungen mit Berührungsthermometern (Hochtemperatur-Thermoelemente) durchführen wird, wurde ein Vergleich der Hochtemperaturskala mit dem japanischen NMIJ durchgeführt. Messungen von 1250 K bis 2800 K mit dem Normal-Strahlungsthermometer der PTB und zwei Normal-Strahlungsthermometern des NMIJ ergaben eine Übereinstimmung deutlich innerhalb der Vergleichsunsicherheiten.



Bild 1: Aufbau des neuen EUV-Reflektometers für große Spiegel im Radiometrielaboratorium der PTB bei BESSY II

Auf dem 8th Temperature Symposium im Oktober in Chicago konnte die PTB über ihre bilateralen Kooperationen berichten, die u. a. dem Anschluss der jeweiligen Partner an die vom CCT durchgeführten Schlüsselvergleiche dienen. Dazu gehören ein Vergleich der ITS-90-Realisierungen vom Argon-Tripelpunkt bis zum Silber-Erstarrungspunkt mit dem slowenischen *Laboratory of Metrology and Quality*, entsprechende bilaterale Vergleiche vom Argonpunkt zum Zink-Erstarrungspunkt mit dem türkischen UME und dem brasilianischen *Inmetro* und zwei Vergleiche vom Quecksilber- bis zum Zinkpunkt und von Pt-100-Thermometern zwischen -20 °C und 250 °C mit dem CENAM in Mexiko.

Überprüfung der Temperaturskala

Die Übereinstimmung der Internationalen Temperaturskala ITS-90 mit der thermodynamischen Temperatur wird derzeit von mehreren NMI auf höchstem Genauigkeitsniveau geprüft. Im Bereich der hohen Temperaturen hat die PTB zwischen 700 K und 1000 K ihre Untersuchungen mit absoluter Strahlungsthermometrie aus früheren Jahren fortgeführt. Die Ergebnisse reihen sich zwanglos ein in die Resultate der späteren Serie von Gasthermometer-Messungen des NIST aus dem Jahre 1989 und schließen sich an aktuelle Messungen des NIST mit akustischer Thermometrie

an, die auf dem bereits erwähnten 8th Temperature Symposium vorgestellt wurden. Die Differenz $T - T_{90}$ wächst offenkundig von 10 mK bei 500 K kontinuierlich mit der Temperatur (Bild 4).

Mit dem Rauschthermometer, das in Zusammenarbeit mit dem *FZ Jülich* entwickelt wurde, steht der PTB als einzigem NMI ein weiteres unabhängiges, primäres Temperaturmessverfahren zur Verfügung, mit dem die thermodynamische Temperatur an vier Fixpunkten zwischen 300 K und 1500 K bestimmt wurde. Verglichen mit den anderen verwendeten Messverfahren sind die Unsicherheiten beim heutigen Stand der Untersuchungen noch nicht konkurrenzfähig, doch die Ergebnisse der Rauschmessungen scheinen sich in den allgemeinen Trend einzuordnen. Ob die Differenz $T - T_{90}$ oberhalb von 1250 K wirklich negativ wird, wie es sich in Bild 4 andeutet, muss durch weitere Messungen auch von anderen NMI geprüft werden.

Am unteren Ende der ITS-90 unterhalb von 1 K, wo sie durch den Dampfdruck von Helium definiert ist, zeigen bisherige Dampfdruckmessungen des NIST und des VSL deutliche Differenzen zu der auf RhFe-Widerständen abgelegten gasthermometrischen Basis der Temperaturskala und weisen außerdem eine große Streuung auf. Neue Dampfdruck-

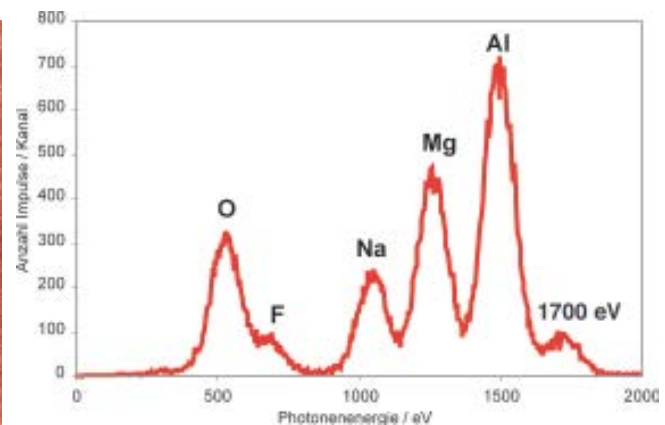
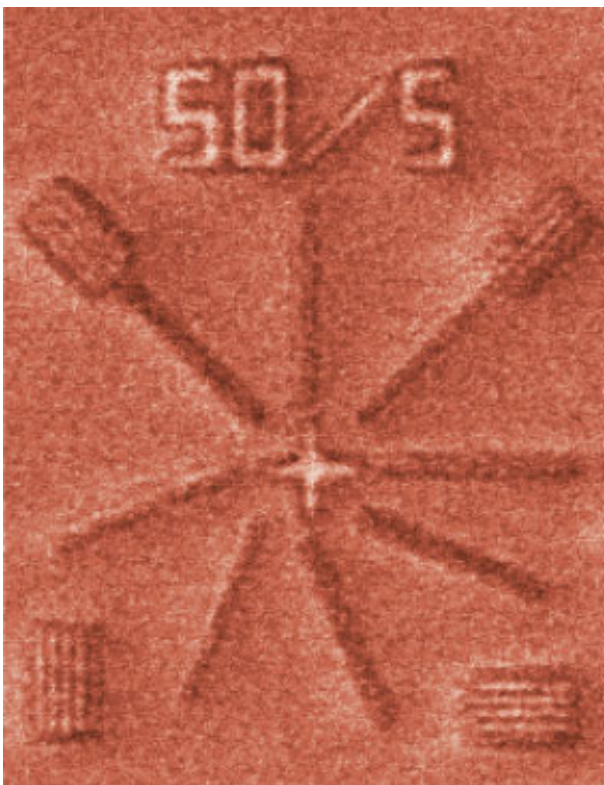


Bild 3: Typisches Röntgenfluoreszenzspektrum der Oberflächenkontamination eines Siliziumwafers mit einer Verunreinigung von 1 ng Na, Mg und Al in einem Tröpfchen. Die Probe wurde mit einer Photonenenergie von 1700 eV angeregt.

Bild 2: Erste in Europa hergestellte 50-nm-Halbleiterstrukturen, mit 13-nm-Synchrotronstrahlung belichtet (Aufnahme: Carl Zeiss)

messungen der PTB mit ^3He in einem speziell zur Minimierung von Fehlereinflüssen konstruierten Kryostaten ergaben jetzt eine gute Übereinstimmung zwischen T_{90} -Dampfdruckwerten und der auf den Widerständen abgelegten so genannten Wire Scale T_{X1} mit einer deutlich reduzierten Unsicherheit (Bild 5).

Zur Realisierung eines neuen Temperaturfixpunkts, der den Dampfdruckbereich der ITS-90 auf einfache Weise abstützen kann, wurde eine „Lambdapunkt-Zelle“ entwickelt, die den Phasenübergang zur Suprafluidität von ^4He bei 2,1768 K nutzt.

Künftige neue Definition der Temperatureinheit Kelvin

Mit der derzeitigen Definition als 273,16-ter Teil der thermodynamischen Temperatur des Wasser-Tripelpunkts basiert das Kelvin auf einer stofflichen Eigenschaft. Wie andere Basiseinheiten soll auch das Kelvin mit Hilfe der Festlegung des Werts einer Naturkonstante definiert werden, um Veränderungen und Alterungserscheinungen der verwendeten

Materialien auszuschließen. Die bisherigen Wasser-Tripelpunktzellen zeigen eine relative Unsicherheit von $3 \cdot 10^{-7}$. Daher muss für eine neue Definition des Kelvin die Boltzmann-Konstante k_B oder die über die Avogadro-Konstante mit ihr verknüpfte Gas-Konstante R mit einer geringeren Unsicherheit bestimmt werden. Mit der Messung der Schallgeschwindigkeit in einem monoatomaren Gas wurde am NIST vor Jahren eine Unsicherheit für k_B von $2 \cdot 10^{-6}$ erreicht. Eine eigene kürzlich fertiggestellte Studie hat ergeben, dass mit Hilfe der in der PTB seit Jahren betriebenen Tieftemperatur-Gasthermometrie, die auf einer präzisen Bestimmung der druck- und temperaturabhängigen Dielektrizitätszahl von Helium beruht, in wenigen Jahren eine vergleichbare Unsicherheit erreicht und danach die des Wasser-Tripelpunktes übertroffen werden kann. Spektrale Messungen der Hohlraumstrahlung mit absolut kalibrierten Filtrerradiometern und die Anwendung des Planckschen Strahlungsgesetzes werden dieses Vorhaben begleiten und die Ergebnisse absichern helfen. Als Partner wollen NIST

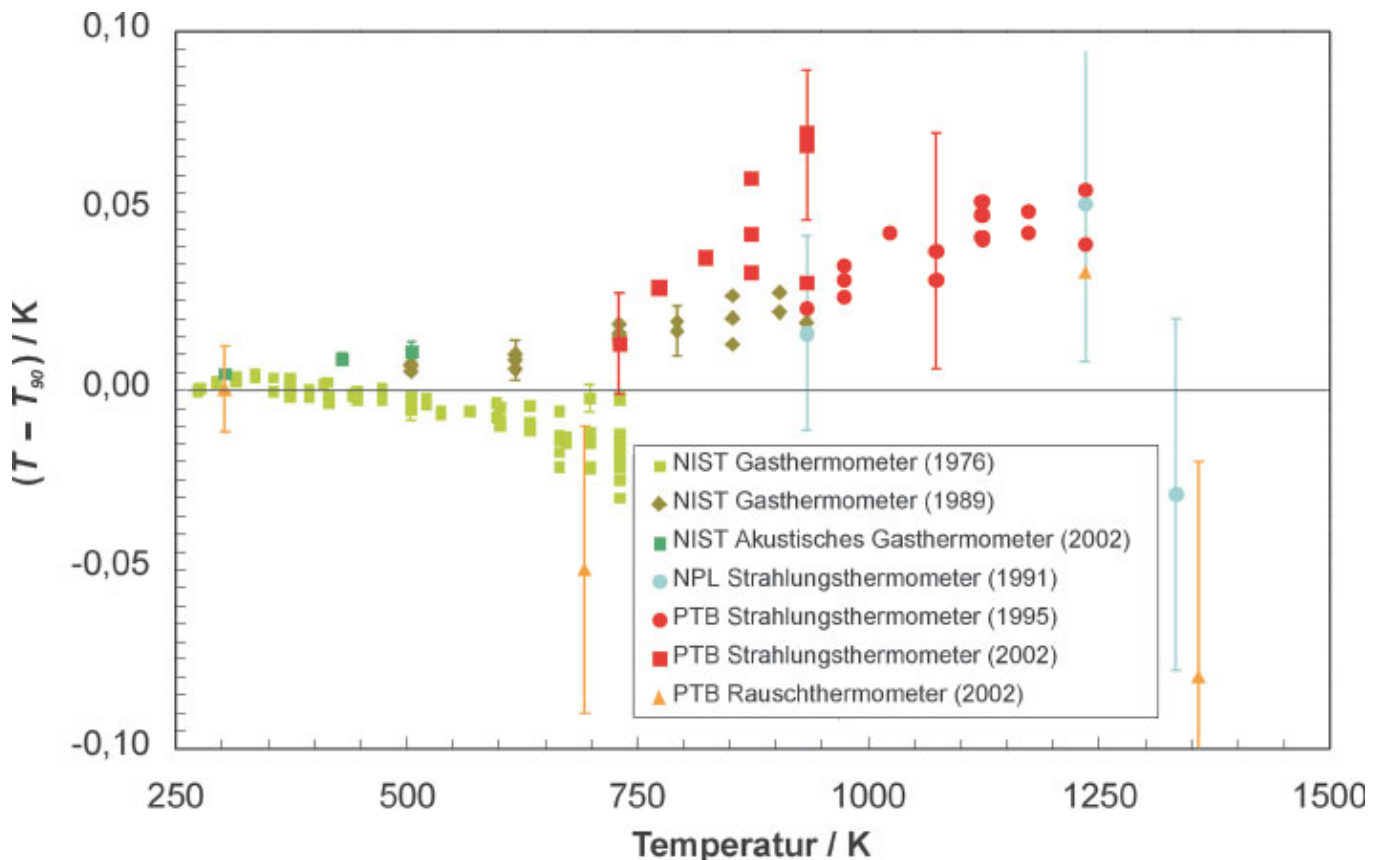


Bild 4: Differenz der thermodynamischen Temperatur T und der Temperatur T_{90} gemäß der Internationalen Temperaturskala ITS-90. Unterhalb von 1250 K werden die Gasthermometer-Messungen des NIST von 1989 und die Strahlungsthermome-

ter-Ergebnisse des NPL von den neuesten Strahlungs- und Rauschthermometer-Messungen der PTB sowie den aktuellen Resultaten der akustischen Thermometrie des NIST bestätigt.

und NPL ihren Teil mit weiteren akustischen Messungen und Gesamtstrahlungsthermometrie nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz beitragen.

Europäische virtuelle Institute

Zur Unterstützung insbesondere auch der mittelständischen Industrie in Deutschland und in der EU beteiligt sich die *Abteilung 7* aktiv bei der Gründung und Förderung einschlägiger virtueller Institute.

Mit EVITherM (*European Virtual Institute for Thermal Metrology*) sollen der rasche, europaweite Informationsaustausch und Wissenstransfer sowie die zielgerichtete Kontaktaufnahme zwischen den Anwendern thermischer Technologien vor allem in der Industrie und den auf diesem Gebiet tätigen Metrologie- und Forschungsinstituten mit Hilfe eines „Internet-Portals“ ermöglicht werden, das umfassenden Zugang zu Informationen über thermometrische und thermophysikalische Messverfahren sowie den entsprechenden Daten und anderen aktuellen Inhalten wie einem Literatur- und Weiterbildungsangebot bietet. Das Projekt mit zunächst 34 Teilnehmern aus zwölf europäischen Staaten soll in der Anfangsphase aus dem EU-Programm „Growth“ gefördert werden und wird Anfang 2003 anlaufen. Es soll sich später selber tragen. Die PTB beteiligt sich als einer von fünf

„Principal Contractors“. Die Abteilung wird die Leitung der Arbeitsgruppen für die berührungslose Temperaturmessung und (gemeinsam mit dem italienischen IMGC) für die Belange der verschiedenen Industriezweige und der europäischen Regionen übernehmen.

Ebenfalls für den Wissenstransfer und als Rahmen für gegenseitige Konsultationen der überwiegend mittelständischen Hersteller von Wärme- und Kältezählern sowie für die Energieversorger und andere Interessenten betreibt die PTB die Gründung eines weiteren virtuellen Instituts mit der Bezeichnung EMITEM (*European Metrology Institute für Thermal Energy Measurement*). Die nationalen Metrologie-Institute aus Frankreich, Dänemark, Schweden, Norwegen, Österreich und der Schweiz wollen sich beteiligen.

Darstellung in der Öffentlichkeit

Das *Institut Berlin* der PTB und mit ihm die *Abteilung 7* haben zum ersten Mal im Rahmen der Berliner „Langen Nacht der Wissenschaften“ Mitte Juni ihre Tore für das interessierte Publikum geöffnet. Während die PTB-Laboratorien bei BESSY II den dortigen Besucherrekord als Teil des Rundgangs durch Speicherring und Experimentierhalle zu bewältigen hatten, besichtigten rund 500 Besucher den Hermann-von-Helmholtz-Bau in Charlott-

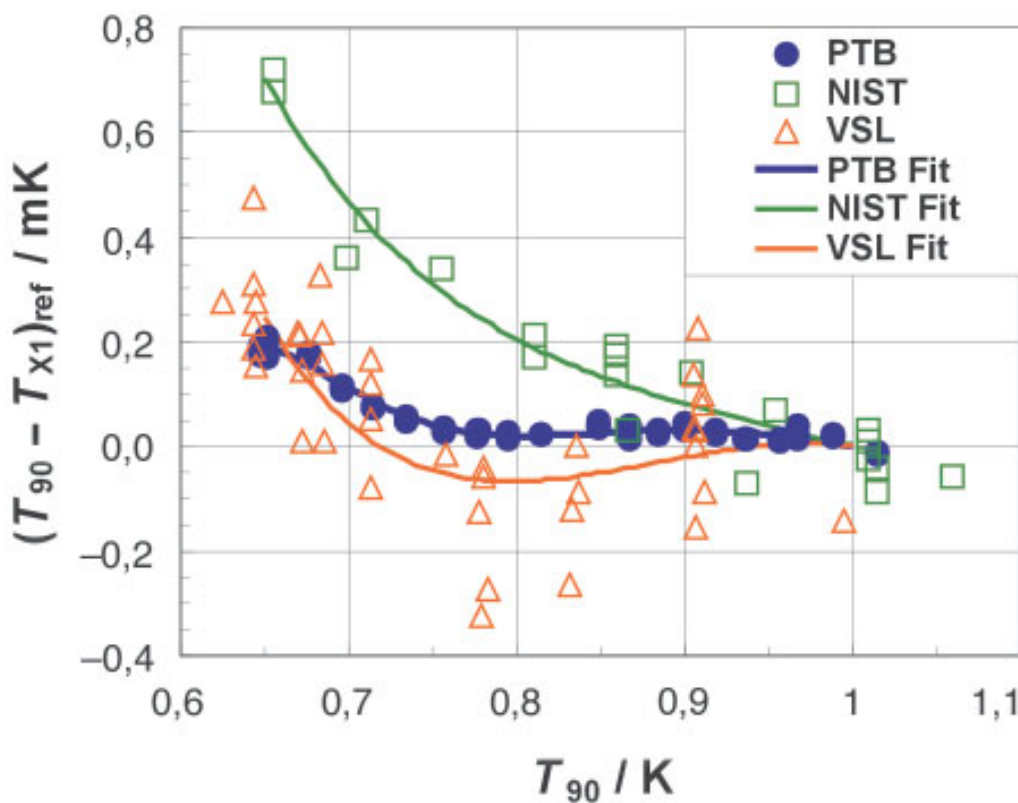


Bild 5: Abweichungen verschiedener Realisierungen der ^3He -Dampfdruckskala von der auf RhFe-Widerständen verbreiteten T_{x1} -Skala, bezogen auf die Abweichungen bei 1 K. Die als „Fit“ bezeichneten Linien dienen nur als Hilfslinien für den Betrachter.

tenburg. Prominenteste Besucher waren der Berliner Senator für Wissenschaft, Forschung und Kultur Dr. Thomas Flierl zusammen mit dem neuen Präsidenten der *Technischen Universität* Prof. Dr. Kurt Kutzler, die sich von den 16 Ausstellungsstationen aus den Themenbereichen Temperatur- und thermische Energiemessung, Medizinphysik und Informationstechnik beeindruckt zeigten (Bild 6).

Die Abteilung hat im Berichtsjahr zwei gut besuchte Konferenzen organisiert, beide Male in Zusammenarbeit mit anderen Berliner Forschungsinstitutionen. 270 Teilnehmer trafen sich im Juni in der *Technischen Universität*, die zusammen mit PTB und BAM Veranstalter der EDXRS 2002 war. Die Palette der Beiträge auf dieser 10. europäischen Konferenz über *Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy* reichte von einer Vielzahl kommerziell hoch interessanter Untersuchungen wie z. B. des quantitativen Nachweises von Kontaminationen auf Halbleiterwafern (s. o.) über von der Erde gesteuerte Analyse-Roboter für den Einsatz auf anderen Planeten zur Entstehungsgeschichte und Autorenidentifikation von herausragenden literarischen Werken wie Goethes Faust oder Schillers Gedichten anhand der Zusammensetzung der für die Manuskripte verwendeten Tinte.

Anfang November trafen sich die Tieftemperaturphysiker aus Deutschland und dem angrenzenden Ausland auf einem vom *Hahn-Meitner-Institut* (HMI) mitorganisierten Symposium über „Tieftemperaturphysik unterhalb 1 K“ im Hermann-von-Helmholtz-Bau. Die über 50 Teilnehmer diskutierten den Stand und die zukünftige Entwicklung auf ihrem Arbeitsgebiet. Im Bereich der von der PTB wesentlich mitgestalteten Tieftemperaturskala PLTS-2000 von 1 K bis 1 mK lässt sich außer an den Konferenzbeiträgen auch anhand der Verkaufszahlen der entsprechenden Kryostaten ein stetiges Wachstum der Forschung und Anwendung feststellen. Der Bereich unterhalb 1 mK bleibt auf absehbare Zeit der reinen Grundlagenforschung vorbehalten und ist nur zugänglich, wenn man das entsprechende Knowhow besitzt oder aber mit großem Zeitaufwand erwirbt. Die Tagung machte deutlich, dass sich in Berlin mit dem HMI, der PTB, der *Freien* und seit kurzem auch der *Humboldt-Universität* inzwischen ein bedeutendes Zentrum der Tieftemperaturphysik in Deutschland entwickelt hat.



Bild 6: Besucher der Berliner „Langen Nacht der Wissenschaften“ im Hermann-von-Helmholtz-Bau; in der Bildmitte der Berliner Senator für Wissenschaft, Forschung und Kultur Dr. Thomas Flierl

In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

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

Grundlagen der Metrologie

Bilateraler Vergleich der Hochtemperaturskala mit dem NMIJ

Für Messungen der Schmelz- und Erstarrungstemperaturen eutektischer Hochtemperatur-Fixpunktstrahler, die im Rahmen eines EU-Projekts anstehen, wurde die PTB-Hochtemperaturskala durch einen Vergleich mit dem japanischen NMIJ weiter abgesichert.

Bilateraler Vergleich von Fixpunktstrahlern mit dem NPL

Der neue Silber-Fixpunkthohlraumstrahler des britischen NPL, der in einem elektrisch beheizten Wärmerohr betrieben wird, wurde erfolgreich mit dem ähnlich konzipierten, wohl etablierten Gold-Fixpunktstrahler der PTB verglichen.

Rauschthermometrische Bestimmung der Erstarrungstemperatur von Kupfer

Die thermodynamische Temperatur des Kupfererstarrungspunkts von rund 1085 °C wurde mit einem Rauschthermometer gemessen. Das Messergebnis stimmt innerhalb der Messunsicherheit mit der radiometrisch bestimmten Temperatur des Fixpunkts überein.

Internationaler Vergleich von Tieftemperaturfixpunkten der ITS-90 in der PTB

Der mehrjährige Vergleich von abgeschlossenen Tripelpunktzellen hat bei den Tripelpunkten von Neon, Sauerstoff und Argon zu einer Verringerung der Standardabweichung der Tripelpunkttemperaturen um mehr als den Faktor zwei auf weniger als 0,1 mK geführt und gezeigt, dass die Definition des Wasserstofftripelpunkts in der ITS-90 bezüglich der Isotopenzusammensetzung präzisiert werden muss.

³He-Dampfdruckskala unterhalb von 1,7 K

Mit einem speziell konstruierten Kryostaten wurden aufwendige Messungen der ³He-Dampfdruck-Temperatur-Beziehung im Bereich von 0,65 K bis 1,7 K durchgeführt. Die Ergebnisse ermöglichen es, Mängel der Internationalen Temperaturskala von 1990 durch eine Revision zu beseitigen.

Sekundärnormale für das Hoch- und Ultrahochvakuum

Magnetron-Ionisationsvakuummeter sind unter reinen Kalibrierbedingungen nur wenig schlechter zur Weitergabe der Vakuumdruckskala unter 1 mPa geeignet als die bisher ausschließlich verwendeten, wesentlich teureren Heißkathoden-Ionisationsvakuummeter.

Quantitativer Nachweis intensiver VUV- und EUV-Strahlung eines Freie-Elektronen-Lasers

Mit dem *Deutschen Elektronen-Synchrotron* (DESY, Hamburg) und dem *Ioffe Physico-Technical Institute* (St. Petersburg, Russland) wurde ein Monitordetektor für intensive und hochgradig gepulste VUV- und EUV-Strahlung entwickelt und zum Patent angemeldet. Ein erster Einsatz am Freie-Elektronen-Laser der Tesla-Test-Facility am DESY verlief erfolgreich.

Kalibrierung hochempfindlicher Lyman-a-Photosensoren für die NASA-Mission TWINS

Im Radiometrielabor der PTB bei BESSY II wurden hochempfindliche Photosensoren zur Messung geokoronaler Lyman-a-Strahlung bei 121 nm kalibriert, die das Institut für *Astrophysik und Extraterrestrische Forschung der Universität Bonn* für die NASA-Mission TWINS entwickelt hat.

Metrologie für die Wirtschaft

SQUIDs können jetzt noch genauer messen

Mit einer computergesteuerten Elektronik und einer neuartigen Kapsel mit integriertem Spulensystem konnte die Leistungsfähigkeit von Sensorsystemen auf der Basis supraleitender Quanteninterferenzdetektoren (sog. SQUIDs) deutlich verbessert werden. Die SQUID-Elektronik ist bereits kommerziell erhältlich; für die Kapsel wurde zunächst eine Patentanmeldung eingereicht.

Laborverstärker mit hochohmigem Eingang und niedrigem 1/f-Rauschen

Das Fachlaboratorium *Kryosensorik* hat einen besonders rauscharmen Messvorverstärker für den Frequenzbereich unterhalb 100 kHz entwickelt, der jetzt von einer Firma gefertigt und vertrieben wird.

Optische Anisotropien in Calciumfluorid bei 112 nm und 157 nm

Als Basismaterial von Linsenoptiken für die 157-nm-Mikrolithographie wird Calciumfluorid eingehend untersucht. In Zusammenarbeit mit *Schott Glas* (Mainz) und *Schott Lithotec* (Jena), dem weltweit führenden Hersteller von Calciumfluorid, wurde im Radiometrielabor der PTB bei BESSY II ein optischer Anisotropieeffekt bei 112 nm gefunden und dafür ein Bezug zu einer bereits früher am NIST nachgewiesenen Anisotropie bei 157 nm hergestellt.

Metrologie für die EUV-Lithographie

Die umfangreiche Unterstützung der europäischen Halbleiterindustrie bei der Entwicklung der Halbleiter-Lithographie mit Strahlung einer Wellenlänge von 13,5 nm im extremen UV (EUV) wurden fortgesetzt und erweitert, u. a. durch Untersuchungen des Reflexionsgrades von Mo/Si-Multilayerspiegeln, die Charakterisierung von Maskenblanks und Masken und die Kalibrierung von Messgeräten zur Charakterisierung von EUV-Strahlungsquellen.

Neues EUV-Reflektometer

Mit dem neuen Reflektometer im Radiometrielabor bei BESSY II besitzt die PTB die weltweit erste Messeinrichtung, in der der Reflexionsgrad von Spiegeln mit bis zu 55 cm Durchmesser und 50 kg Gewicht „at wavelength“ bei 13 nm mit kleinen Unsicherheiten bestimmt werden kann.

Laborreflektometersystem

Unter Leitung des *Fraunhofer-Instituts für Werkstoff- und Strahltechnik* Dresden wurde mit dem Industriepartner *Carl Zeiss SMT AG* ein Laborreflektometersystem für den EUV-Optik-Fertigungsprozess entwickelt. Die PTB war dabei beratend tätig und für die Charakterisierung der einzelnen Komponenten verantwortlich.

Systemmesstechnik für Projektionsoptiken der EUV-Lithographie

Mit dem so genannten Micro Exposure Tool für die Waferstrukturierung bei 13 nm des Industriepartners *Carl Zeiss*, das im Juli 2001 im PTB-Labor bei BESSY II aufgebaut worden war, wurden Anfang 2002 zum ersten Mal in Europa Chipstrukturen mit Abmessungen von nur 50 nm belichtet.

Internationaler Vergleich von EUV-Reflexionsgradmessungen

Ein internationaler Vergleich der Reflexionsgradmessung im EUV-Bereich mit vier anderen Instituten aus den USA und Japan ergab Übereinstimmung im Rahmen der jeweiligen Messunsicherheiten. Insbesondere stimmten die Ergebnisse des CXRO (*Center for X-Ray Optics*, USA) und der PTB als den Laboratorien mit den kleinsten relativen Messunsicherheiten von 0,14 % überein.

Röntgenfluoreszenzanalyse mit Synchrotronstrahlung auf 300-mm-Siliziumwafern

An einem neuen Messplatz zur quantitativen Röntgenfluoreszenzanalyse von Siliziumwafern mit 200 mm und 300 mm Durchmesser können mit kontinuierlich durchstimmbarer Undulatorstrahlung kleinste Mengen leichter Elemente, ihre Verbindungszustände sowie die jeweiligen Massenbelegungen zerstörungsfrei bestimmt werden.

Metrologie für die Gesellschaft

Wärmezähler für Glykol-Wasser-Gemische in thermischen Solaranlagen

Mit Unterstützung der *Deutschen Stiftung Umwelt* wurden unterschiedliche Durchflusssensoren für Glykol-Wasser-Gemische (GWG) als Wärmeträger in thermischen Solaranlagen untersucht. Als geeignet erwiesen sich nur elektronisch abgetastete Flügelradzähler. Überraschend entsprachen die meisten Rechenwerke für GWG nicht dem Stand der Technik.

Internationale Angelegenheiten

PTB-Vakuumdruckskala weltweit zunehmend gefragt

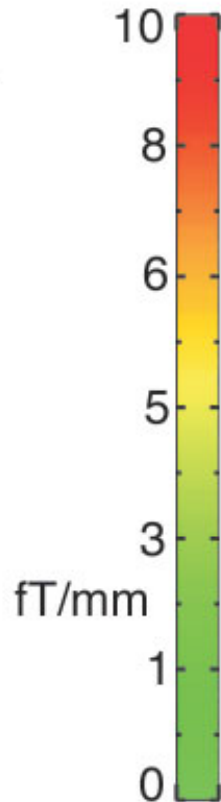
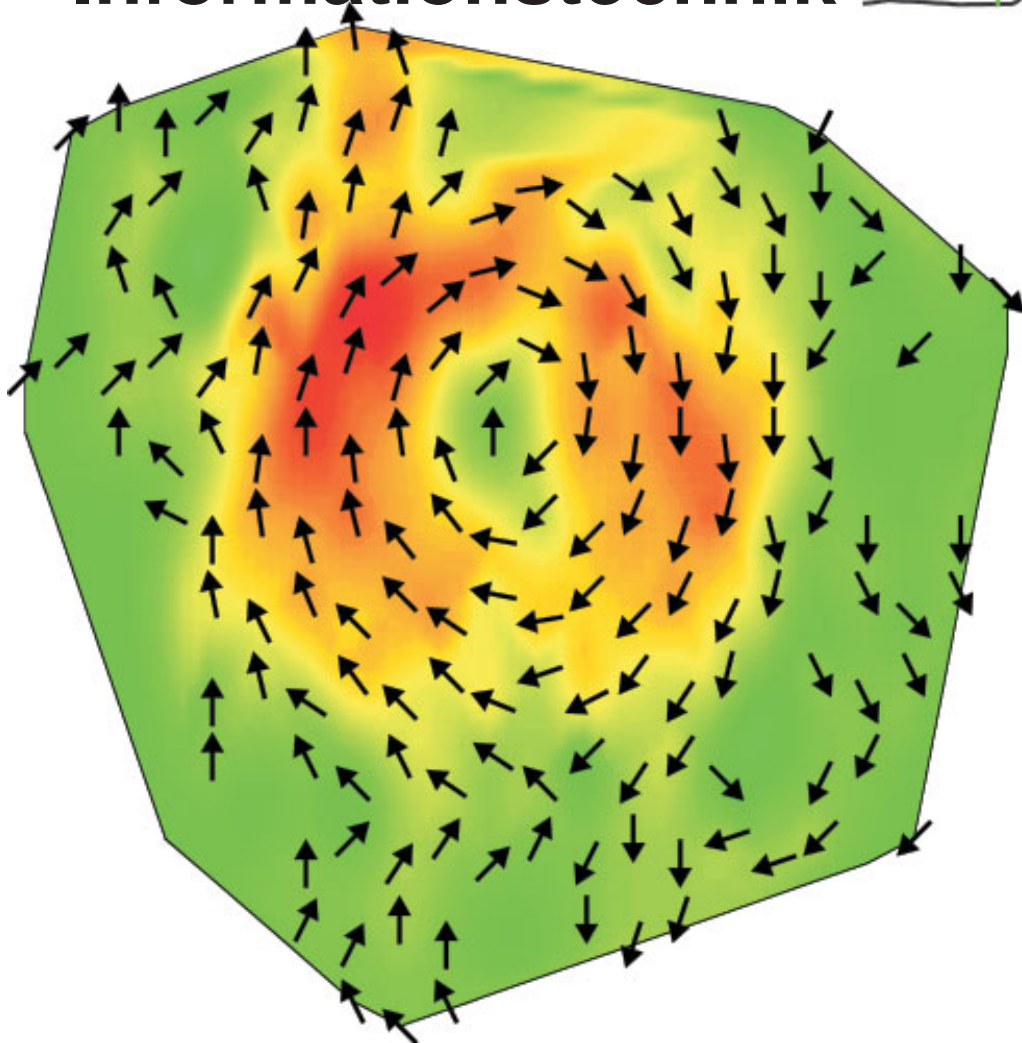
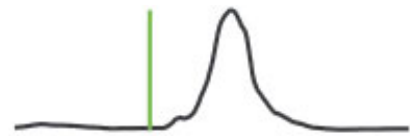
Insgesamt 13 Länder in Lateinamerika, Südostasien und Europa führen ihre Skala im Vakuumdruckbereich auf die PTB-Skala zurück. Die Gesamtzahl der Kalibrierungen für Kunden hat sich innerhalb von drei Jahren nahezu verdreifacht.

Temperatur-Vergleichsmessungen zwischen akkreditierten Kalibrierlaboratorien in Deutschland und Mexiko

Ein Ringvergleich zwischen vier in Deutschland (DKD) und vier in Mexiko (SNC) akkreditierten Kalibrierlaboratorien für die Messgröße Temperatur im Bereich von -20 °C bis

250 °C ergab insgesamt der Eindruck, dass für einige SNC-Laboratorien die Akkreditierungsstelle die kleinste angebbare Messunsicherheit zu gering angesetzt hat, während sie bei einigen DKD-Laboratorien unnötig hoch war. Weitere Maßnahmen zur internationalen Harmonisierung bei den akkreditierten Laboratorien erscheinen notwendig.

Medizinphysik und metrologische Informationstechnik



Berichte der Abteilungen

Medizinphysik metrologisch Information

Beteiligung der Abteilung 8 am neugegründeten „Berlin Neuroimaging Centre“

Das Arbeitsgebiet Medizinphysik der *Abteilung 8* setzt – wie kein anderes Fachgebiet – die Zusammenarbeit mit externen Partnern, vor allem aus den Lebenswissenschaften und der Medizin, aber auch aus den Naturwissenschaften und der Industrie voraus, um dem gesetzlichen Auftrag der PTB auf diesem Gebiet, d. h. der Sicherstellung der Einheitlichkeit des Messwesens in der Medizin, gerecht zu werden und Beiträge zum Erhalt und der Wiederherstellung der Gesundheit des Bürgers zu leisten. Im Jahre 2002 wurde mit der Gründung des „Berlin Neuroimaging Centre“ (BNIC) ein weiterer Schritt getan, die gute Einbindung der *Abteilung 8* in das regionale biomedizinische und wissenschaftliche Umfeld zu verbessern. Das BNIC, das von der *Humboldt Universität* Berlin koordiniert wird und von ihr gemeinsam mit der *Freien Universität* Berlin und der PTB beantragt wurde, ist eines von fünf vom BMBF in Deutschland geförderten Zentren für Bildgebung in den klinischen Neurowissenschaften. Es ist geplant, dass nach einer maximal sechsjährigen Förderung durch das BMBF diese Zentren durch die beteiligten Institutionen finanziert und weitergeführt werden. Die *Abteilung 8* beteiligt sich an dem BNIC mit den beiden Infrastrukturprojekten „MR Physik/MR Messtechnik“ und „Biomagnetismus/MEG“ und verstärkt hierdurch ihre Aktivitäten auf dem Gebiet der neurologischen Messtechnik. Die Bedeutung, die die Magnetenzephalographie (MEG) als klinische Untersuchungsmethode inzwischen gewonnen hat, wird durch die Tatsache unterstrichen, dass mit Beginn

des Jahres 2003 Untersuchungen z. B. zur Lokalisation von fokalen epileptischen Herden oder des visuellen oder motorischen Kortex mittels MEG in den USA von den dortigen Krankenversicherungen bezahlt werden. Neben Forschungs- und Entwicklungsarbeiten, die die PTB im Rahmen von Kooperationen in den beiden Infrastrukturprojekten durchführt, stellt die PTB den am BNIC beteiligten neurowissenschaftlichen und klinischen Arbeitsgruppen ihre gesamte messtechnische Infrastruktur auf diesen Gebieten sowie ihre Erfahrungen in der Messdatenerfassung, Signalverarbeitung, Datenanalyse und Modellbildung zur Verfügung.

Die Entwicklung eines nicht-invasiven Messverfahrens zur Bestimmung von Konzentrationsänderungen von Hämoglobin sowie der Sauerstoffsättigung des Bluts in der Großhirnrinde Erwachsener wird seit einiger Zeit von der PTB gemeinsam mit der *Neurologischen Klinik* der *Charité* Berlin vorangetrieben und wird zukünftig im Rahmen des BNIC verfolgt werden. Aufbauend auf Ergebnissen, die in einer in der PTB und *Neurologischen Klinik* der *Charité* durchgeführten Doktorarbeit erzielt wurden, ist von einem Marie-Curie-Stipendiaten der Europäischen Gemeinschaft in der PTB im vergangenen Jahr ein neuer Messaufbau zur zeitaufgelösten diffusen Reflexion von Pikosekunden-Laserimpulsen am Kopf entwickelt und in der *Charité* aufgebaut worden. Dieser Messplatz erlaubt Flugzeitmessungen von Photonen simultan bei drei verschiedenen Wellenlängen und vier verschiedenen Quelle-Detektor-Abständen. Hierdurch ist es möglich, Absorptionsänderungen, z. B. hervorgerufen durch eine funktionelle Stimulation des Gehirns tiefenselektiv in verschiedenen Kompartimenten des Kopfes (Gehirn, Kopfhaut) zu bestimmen. Hierzu wurde ein neues, robustes Datenanalyseverfahren unter Verwendung von Momenten der bei verschiedenen Quelle-Detektor-Abständen gemessenen Laufzeitverteilungen von Photonen entwickelt und

Titelbild

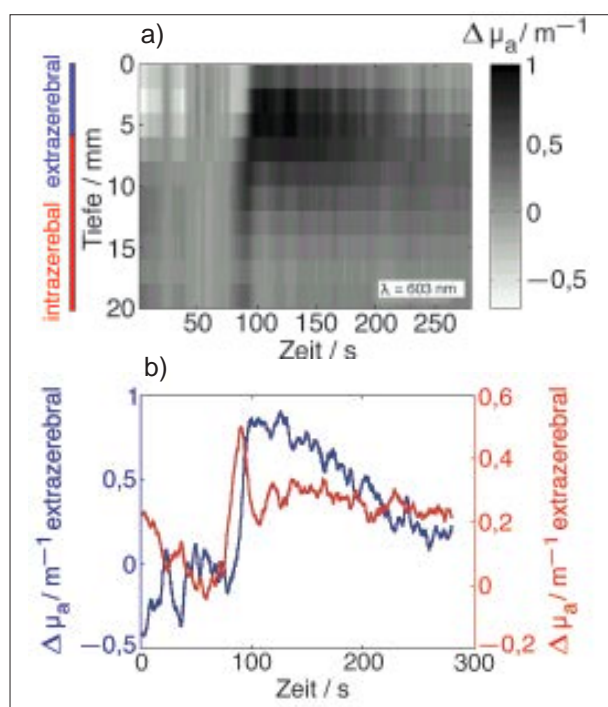
Pseudostromdichtedarstellung der bioelektrischen Erregungsausbreitung im Herzen zu einem Zeitpunkt, der im EKG-Signal (oben rechts; QRS-Komplex) mit der grünen Linie markiert ist.

Physik und

Medizin

Technologie

mittels Monte-Carlo-Simulationen für ein geschichtetes Medium sowie anhand von Probandenmessungen getestet. Zusammen mit der *Neurologischen Klinik der Charité* konnten intrazerebrale von extra-zerebralen Änderungen der Absorption nach visueller oder motorischer Stimulation des Gehirns sowie nach einem Kontrastmittel-Bolus differenziert werden. Bild 1 a zeigt die Änderungen des Absorptionskoeffizienten in zehn 2 mm dicken Schichten eines geschichteten Kopfmodells nach intravenöser Applikation eines Bolus von Indocyaningrün zum Zeitpunkt nach 60 Sekunden. Deutlich ist die anfängliche Erhöhung der Absorption bis in eine Tiefe von 12 mm zu erkennen. Im Bild 1 b wird die mittlere Absorptionsänderung in den ersten drei Schichten (extrazerebral) und den übrigen Schichten (intrazerebral) gezeigt. Das intrazerebrale Kompartiment zeigt den raschen Durchgang des Bolus, während extrazerebral der Farbstoff nur langsam (aus der Haut) ausgewaschen wird. Es ist denkbar, dass die zeitaufgelöste diffuse Reflexions-Spektroskopie zur Überwachung von Schlaganfallpatienten eingesetzt werden kann.



Industrielle Kooperationen auf dem Gebiet der Medizinphysik

Zusammen mit dem *Universitätsklinikum Benjamin Franklin (UKBF)* und der *Schering AG* führt die PTB ein durch das BMBF seit Anfang 2002 gefördertes Vorhaben zur Verbesserung der Interferon-Therapiekontrolle von Patienten durch, die an Myokarditis erkrankt sind. Myokarditis ist eine entzündliche Erkrankung des Herzmuskels, die häufig von Viren ausgelöst wird. Bis heute gelingt eine zuverlässige Diagnose nur mittels immunhistologischer Untersuchungen an Biopsien. Ein erfolgversprechender Ansatz ist eine Therapie unter Verwendung von b-Interferon, die allerdings eine genaue Kontrolle des Therapieverlaufs erfordert, um gegebenenfalls geeignet intervenieren zu können.

Erste Untersuchungen mit dem Magnetokardiographiesystem der PTB haben ergeben, dass der Grad der Entzündung mit einer Kennzahl („circulation“) zu korrelieren scheint, die sich aus den Magnetkardiographie-Signalen extrahieren lässt und die bestimmte Muster der Schlag-zu-Schlag-Variabilität parametrisiert. In dem auf drei Jahre befristeten Vorhaben soll gemeinsam mit dem UKBF und der *Schering AG* geklärt werden, ob sich die bisherigen Ergebnisse, die sich auf eine zu geringe Fallzahl stützen, auch bei umfangreicheren Untersuchungen als tragfähig erweisen. Weiterhin soll die signalanalytische Methode zur Extraktion der Kennzahl kritisch untersucht und verbessert werden. Durch numerische Modellbildung der Herzfunktion und Vorwärtsrechnung soll der Zusammenhang zwischen elektrischer Erregungsausbreitung im Herzmuskel und der MKG-Signalentstehung genauer analysiert werden.

Bild 1: Absorptionsänderungen als Funktion der Zeit nach intravenöser Gabe eines Kontrastmittel-Bolus (Indocyaningrün) für verschiedene Tiefenschichten (oben) und als Mittelwerte im extra- und intrazerebralen Kompartiment (unten)

In Bild 2 sind erste Ergebnisse einer derartigen Simulation für ein 2-D-Modell-Myokard mittels eines Tridomain-Modells gezeigt. Die durch eine Entzündung verursachte Inhomogenität der Faserstruktur des Gewebes ruft eine deformierte Erregungsausbreitung hervor (Bild 2 a), die zu der in Bild 2 b gezeigten Magnetfeldverteilung führt. Derartige Rechnungen sind im Laufe des Vorhabens durch realistischere dreidimensionale Modelle zu verfeinern.

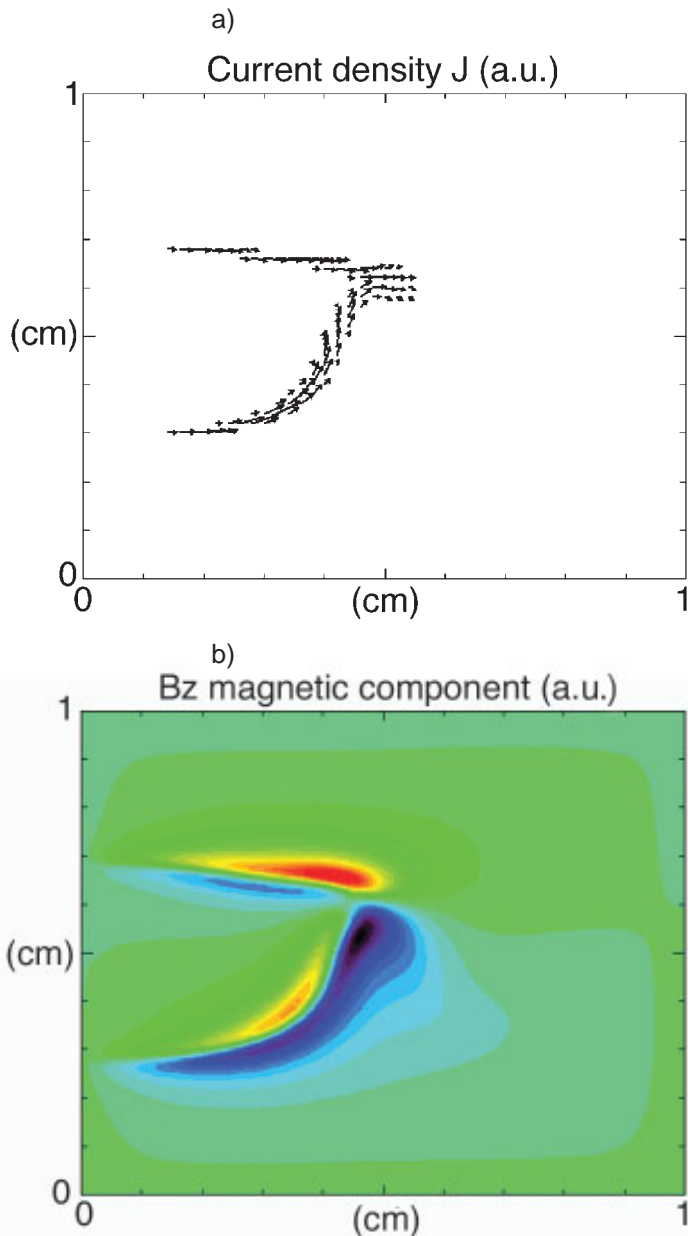


Bild 2: Simulation der Stromdichteverteilung einer bioelektrischen Erregungsausbreitung in einem 2-D-Modell des Herzmuskelgewebes (Fläche: 1 cm \times 1 cm) bei Vorliegen einer Inhomogenität in der Muskelfaserstruktur (oben) und zugehöriges magnetisches Nahfeld 1 mm oberhalb der Gewebeprobe (z-Komponente; unten). Pfeil- und Falschfarbenskalisierung in willkürlichen Einheiten

In den letzten Jahren ist von Mitarbeitern der Abteilung ein Verfahren entwickelt und patentiert worden, mit dem EKG-Aufnahmen diagnostisch klassifiziert und die zugrunde liegenden Herzerkrankungen in ihrem Verlauf verfolgt werden können. Die Grundlage dieses Verfahrens bildet ein Mustervergleich eines gemessenen EKG-Signals mit befundenen EKG-Signalen einer umfangreichen Datenbank. Für den Mustervergleich werden die Signale geeignet skaliert und eine Kreuzkorrelation durchgeführt. Die prozentuale Verteilung der Befunde der dem gemessenen Signal ähnlichsten Signale der Datenbank werden als Wahrscheinlichkeit für eine diagnostische Klassifizierung des gemessenen Signals gewertet.

Sind beispielsweise von den 100 ähnlichsten Signalen aus der Datenbank 20 % als herzgesund, 70 % als Myokardinfarkt und 10 % als Linksschenkelblock befundet, so wird angenommen, dass das gemessene EKG von einem Patienten stammt, der mit hoher Wahrscheinlichkeit einen Myokardinfarkt erlitten hat. Werden nun von einem Patienten wiederholt im Abstand mehrerer Tage oder Wochen EKG aufgenommen, so kann an der Veränderung der Prozentzahlen der Verlauf der Erkrankung quantitativ verfolgt werden. Für eine derartige Verlaufskontrolle von kardiologischen Erkrankungen während der Rehabilitation oder bei der häuslichen Pflege bietet sich der Einsatz von telemedizinischen Lösungen an. Seit Sommer 2002 führt die PTB im Rahmen eines BMBF-Vorhabens zusammen mit der Firma *getemed Medizin- und Informationstechnik* aus dem Berlin-Brandenburger Raum ein telemedizinisches Demonstrator-Projekt durch, in dem zusammen mit drei klinischen Partnern mit einer Client-Server-Lösung zur EKG-Verlaufskontrolle die Praxistauglichkeit des Verfahrens nachgewiesen werden soll.

Gemeinsam mit der *Bruker Medical GmbH* entwickelt die Abteilung in einem vom BMWA geförderten Projekt Phased-Array-Spulen für die 3-Tesla-Kernspintomographie und Spektroskopie. Wegen der hohen Dielektrizitätskonstanten von Wasser ist die Wellenlänge der elektromagnetischen Strahlung für Kernresonanzübergänge von Protonen bei 3 Tesla im Körper auf ca. 30 cm verkürzt. Durch die Ausbildung von stehenden elektromagnetischen Wellen wird die örtliche Verteilung

lung der NMR-aktiven B_1 -Komponente des magnetischen Hochfrequenzfelds im Körper stark verändert. Durch amplituden- und phasengesteuerte Anregung der einzelnen Elemente eines Antennen-Arrays lässt sich diese B_1 -Verteilung beeinflussen, um beispielsweise eine möglichst homogene Verteilung im Körper zu erzeugen. Es wurden die Verteilungen der B_1 -Amplitude und -Phase im Inneren von Phantomen für verschiedene Spulen sowohl mit Hilfe der NMR-Bildgebung gemessen als auch mit dem FDTD-(finite difference time-domain)Verfahren berechnet. Bild 3 (links) vergleicht gemessene und berechnete (B_1^+)-Amplituden, die von einer kreisförmigen Oberflächenspule pro $\sqrt{\text{kW}}$ HF-Sendeleistung in einer axialen Schicht eines kugelförmigen Phantoms erzeugt werden. Die rechte Seite des Bilds zeigt die gute Übereinstimmung zwischen berechneten und gemessenen B_1 -Amplituden entlang zweier Schnittlinien. Durch derartige Simulationsrechnungen lässt sich die Entwicklung von Antennen-Systemen erheblich beschleunigen und die gemessenen Verteilungen der B_1 -Komponente besser verstehen.

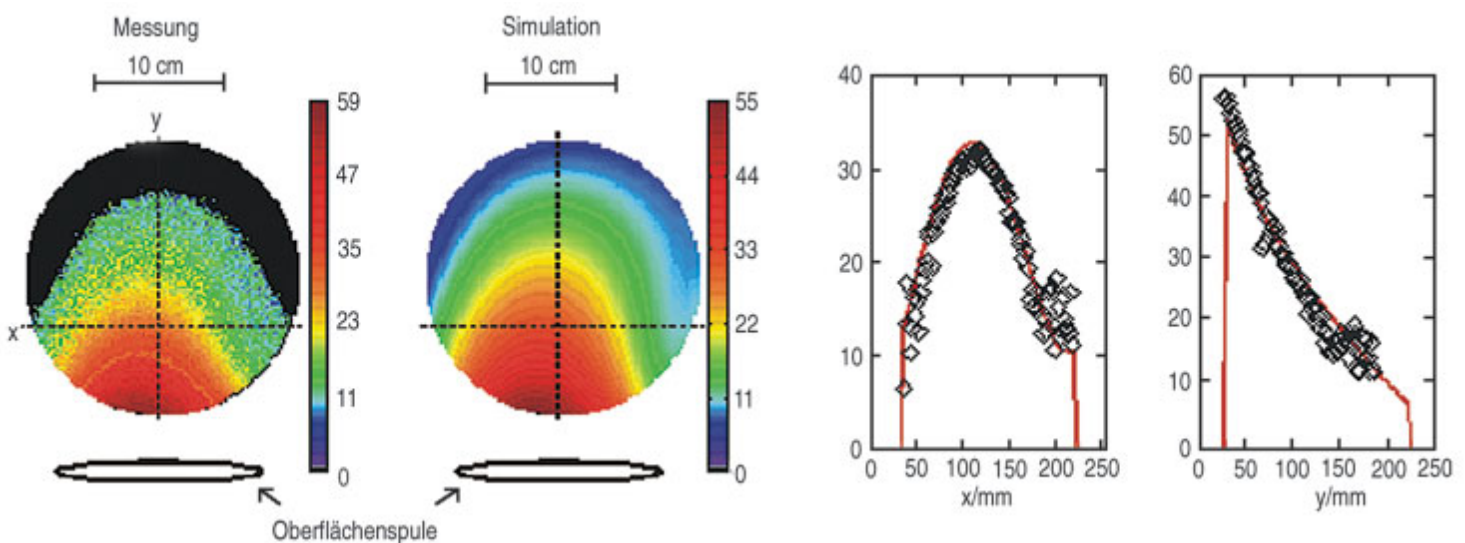
Bild 3: links: gemessene bzw. simulierte B_1 -Verteilung in $\mu\text{T}/(\text{kW})^{0.5}$ in einer Schnittebene durch das Zentrum des Phantoms
 rechts: die gemessene Verteilung längs der x- bzw. y-Achse (Quadrate) stimmt sehr gut mit der berechneten (rot) überein.

Normung und begleitende Forschung in der medizinischen Messtechnik

Die PTB ist Koordinator eines im Jahre 2002 begonnenen EU-Projekts, das als „dedicated call“ ausgeschrieben worden war und die Entwicklung eines Prüfnormals für nicht-invasive Blutdruckmessgeräte zum Ziel hat. Damit sollen zukünftig die bisher von der europäischen Norm EN 1060 geforderten, sehr aufwendigen klinischen Prüfungen teilweise ersetzt werden. Der niederländische Industriepartner im Projekt, die Firma *LODE B. V. Medical Technology*, soll die Fertigung des in der PTB entwickelten Prototyps übernehmen. An einem weiteren EU-Projekt ähnlicher Ausrichtung, in dem Prüfnormale für Spirometer entwickelt werden, ist die PTB ebenfalls beteiligt.

4. Ferrofluid-Workshop in der PTB

In der PTB Berlin-Charlottenburg fand in der Zeit vom 3. bis 7. Juli 2002 der 4. Ferrofluid-Workshop mit über 100 Teilnehmern statt. Der Workshop wurde vom Fachlaboratorium 8.21 gemeinsam mit dem *Hahn-Meitner-Institut* Berlin ausgerichtet. Auf diesem Workshop wurden auch Ergebnisse vorgestellt, die im Rahmen des von der DFG geförderten Forschungsschwerpunktprogramms über Ferrofluide erzielt worden waren. An diesem Programm beteiligen sich mehrere Forschungs- und Entwicklungsgruppen der Industrie, die PTB entwickelt ein Verfahren zur Standardisierung der messtechnischen Charakterisie-



rung von Ferrofluid-Nanopartikeln und hat u. a. ein Messunsicherheitsbudget für die Suszeptometrie von magnetischen Nanopartikeln erarbeitet.

Schwerpunktevaluation der Metrologischen Informationstechnik

Im Zusammenhang mit der Evaluation der PTB fand die Schwerpunktevaluation der Metrologischen Informationstechnik, in dessen Mittelpunkt der Fachbereich 8.3 stand, eine erhebliche Aufmerksamkeit. Der Fachbereich und weitere zum Gebiet zuzurechnende Arbeitsgruppen arbeiteten umfassende Materialien aus, stellten sich einer international besetzten Expertenkommission an zwei Tagen vor und präsentierten ihre Ergebnisse und Zukunftskonzepte.

Eine zentrale Frage der Schwerpunktevaluation war die zukünftige Entwicklung des Gebiets unter Beachtung der besonderen Anforderungen in der PTB. Unter diesem Blickwinkel waren der Ist-Stand zu bewerten und Empfehlungen für die zukünftige Gestaltung zu geben.

Die Expertenkommission äußerte sich während des Besuches anerkennend über das hohe Niveau z. B. der Softwareprüfbarkeit und betonte die internationale Führungsrolle in Softwarefragen. Sie unterstrich die Notwendigkeit der weiteren Verstärkung der Aufmerksamkeit auf Fragen der Daten- und Softwaresicherheit. Die Kommission betonte weiterhin die wachsende Bedeutung der Datenanalyse sowie der mathematischen Modellierung und Simulation in der Metrologie und plädierte bei Anerkennung der bisherigen guten Arbeit für eine Stärkung des Gebiets. Darüber hinaus wurden eine Reihe von konkreten Empfehlungen zur weiteren Gestaltung des Arbeitsgebiets gegeben.

Datenanalyse bei Laboratoriumsvergleichen

Im Zuge der Umsetzung des MRA (Mutual Recognition Arrangement) haben internationale Laboratoriumsvergleiche (Key Comparisons) eine zunehmende Bedeutung erlangt. Eine Schlüsselrolle bei diesen Vergleichen nimmt die Auswertung der Messungen ein. Das Fachlaboratorium 8.31 hat die Arbeiten auf diesem Gebiet intensiviert und durch Zusammenarbeit mit den Projekten Q.101

und Q.102 in Braunschweig zur Verstärkung der Stellung der PTB auf diesem Gebiet beigetragen.

Ein Höhepunkt war der von der PTB im Dezember 2002 veranstaltete internationale Workshop „Data Analysis of Interlaboratory Comparisons“. Dieser Workshop, der zugleich von der BAM mitgestaltet und vom *Helmholtz-Fonds e.V.* sowie dem Europäischen Netzwerk „SofTools_MetroNet“ gefördert wurde, war Bestandteil einer Reihe internationaler Workshops des Jahres 2002 zu vergleichbaren Themen. Insbesondere wurden im PTB-Workshop reale Fallbeispiele vorgestellt und interdisziplinär zwischen Spezialisten der Datenanalyse und Metrologen diskutiert, die Laboratoriumsvergleiche durchführen. Der Workshop bot auch Gelegenheit, methodische Ähnlichkeiten bei unterschiedlichen Anwendungsgebieten, z. B. bei metrologischen Ringvergleichen und bei Vergleichen von Materialtests, festzustellen.

In Zusammenarbeit mit dem Fachlaboratorium 1.22 *Beschleunigung* wurde die Analyse des CCAUV.V-K1-Ringvergleichs von Beschleunigungsaufnehmern durchgeführt. An diesem Ringvergleich, der vom Fachlaboratorium 1.22 als Pilotlabor koordiniert wurde, haben sich insgesamt zwölf nationale Metrologie-Institute beteiligt und mit zwei Beschleunigungsaufnehmern Messungen bei jeweils 22 verschiedenen Frequenzen durchgeführt. Neben der Analyse des Ringvergleichs ist das Datenmaterial auch für vergleichende methodische Untersuchungen verwendet worden. Zur Bestimmung der Referenzwerte wurde die Methode des gewichteten Mittels benutzt. Hierdurch wird die unterschiedliche Güte der einzelnen Ergebnisse – ausgedrückt durch die beigeordneten Unsicherheiten – berücksichtigt. Eine Überprüfung ergab, dass Schätzwerte und beigeordnete Unsicherheiten der einzelnen Laboratorien konsistent sind. Die gewählte Methode zur Referenzwertbestimmung ist damit in Übereinstimmung mit Empfehlungen der „BIPM director’s advisory group on uncertainties“.

Bild 4 zeigt den Grad der Äquivalenz bei der Frequenz 160 Hz für den „back-to-back“-Beschleunigungsaufnehmer. Die Ergebnisse der verschiedenen Staatsinstitute sind hier in guter Übereinstimmung. Bemerkenswert ist

auch die Tatsache, dass die PTB in diesem Ringvergleich mit ihren Ergebnissen deutlich kleinere Unsicherheiten als alle anderen Teilnehmer erzielen konnte.

Die Grundlagenarbeiten zur Auswertung von Ringvergleichen wurden im Jahre 2002 fortgesetzt. So wurden etwa unterschiedliche Verfahren zur Bestimmung des Referenzwertes auf der Basis der Daten des CCAUV.V-K1-Ringvergleichs miteinander verglichen. Bild 5 zeigt die entsprechenden Ergebnisse für den Beschleunigungsaufnehmer „back-to-back“. Man erkennt, dass die Unterschiede zwischen den Methoden in diesem Fall klein sind und dass die empfohlene Methode – das gewichtete Mittel – im Vergleich zu den anderen Verfahren ausgewogene Resultate ergibt.

Weiter wurden die Eigenschaften der früher im Fachlaboratorium 8.31 entwickelten, modellgestützten Analyse von Ringvergleichen näher untersucht. Die modellgestützte Analyse lässt sich vorteilhaft bei Ringvergleichen einsetzen, bei denen Messungen in Abhängigkeit von Parametern, wie beispielsweise der Frequenz oder der Temperatur, durchgeführt werden, wenn ein physikalisches Modell für die Abhängigkeit der Messgrößen von den Parametern existiert. Hier wurde insbesondere der Einfluss serieller Korrelationen auf die Bestimmung der Referenzkurve und ihrer beigeordneten Unsicherheit untersucht.

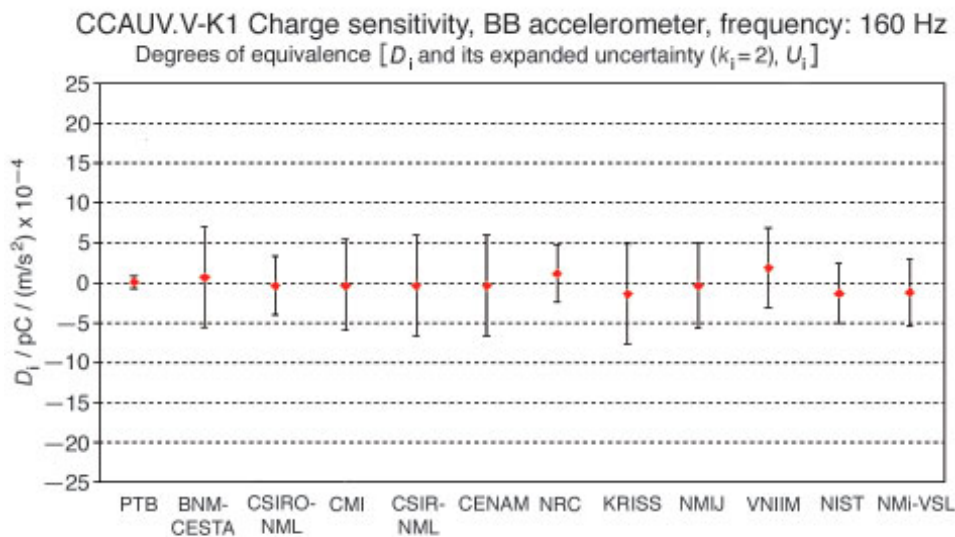


Bild 4: Differenzen D der Messwerte zum Referenzwert und beigeordnete, erweiterte Unsicherheiten ($k = 2$) bei der Messfrequenz 160 Hz („back-to-back“-Beschleunigungsaufnehmer)

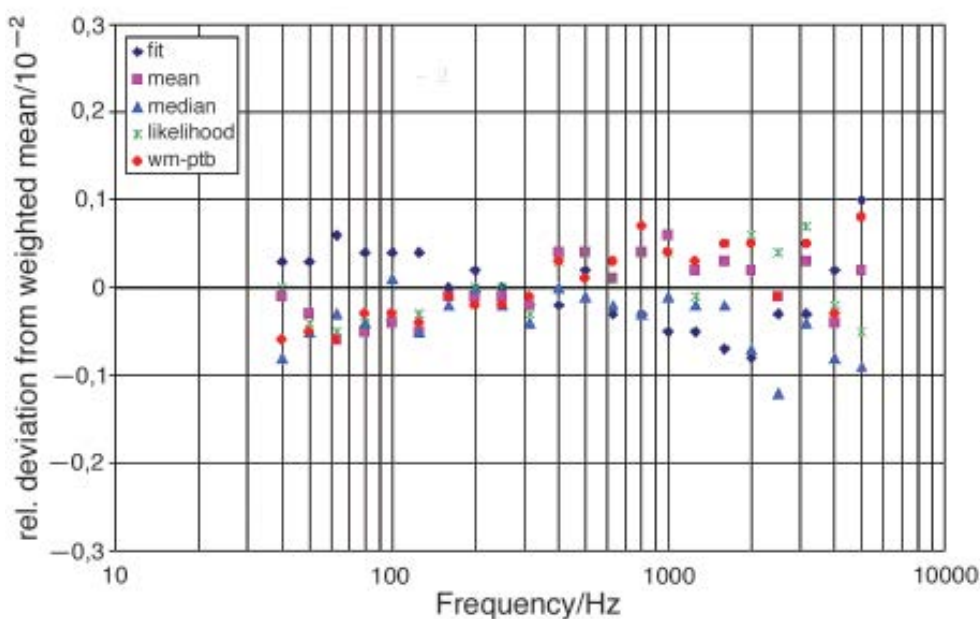


Bild 5: Relative Abweichungen von unterschiedlich berechneten Referenzwerten zum Referenzwert, der nach der Methode des gewichteten Mittels berechnet wurde („back-to-back“-Beschleunigungsaufnehmer). „wm-ptb“ bezeichnet die Abweichungen der Resultate des gewichteten Mittels für eine Berechnung ohne Einschluss der PTB-Messergebnisse.

In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

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

Grundlagen der Metrologie

Quantitative Charakterisierung von Phased-Array-Antennen für die Kernspintomographie – Vergleich mit Simulationsrechnungen

Entwicklung amplituden- und phasenmodulierter HF Impulse für die Kernspintomographie/In-vivo-Spektroskopie

Analyse von Kurzzeitsignalen bei niedrigem Signal-Rausch-Verhältnis

Fertigstellung eines 384-kanaligen Messdatensystems für Biosignale

Schnelle Datenübertragung im eigensicheren Bereich

Metrologie für die Wirtschaft

Fertigstellung des Funktionsmusters für einen mehrkanaligen Laserimpuls-Mammographen

Lasergestützte Therapie/Therapiekontrolle zur Behandlung der Makuladegeneration

B₁-Shimming und B₁-Fokussierung für die Kernspintomographie/Spektroskopie

Physikalische Charakterisierung von Ferrofluid-Nanopartikeln

Anforderungskatalog zur Validierung von Prüfmittelsoftware

Sicherer elektronischer Messdatenaustausch

Drahtlose Übertragung von Messdaten

Abschluss des Normungsvorhabens Labor-datenkommunikation

Auswertung von Interferogrammen optischer Oberflächen

Software für die Auswertung von Krümmungsmessungen

Umstellung der Geldspielgeräte auf EURO verlief reibungslos

Metrologie für die Gesellschaft

Beobachtung nicht-verstärkter Immunfluoreszenz in Gewebeschnitten

Nachweis seltener Zellen im Blut von Malaria-Patienten

Ringversuche zum Kleinen Blutbild

Nachweis von Tumorstufen in der Speiseröhre

Optisches Kontrastmittel „Indocyanin Grün“ (ICG) für die optische Mammographie eingesetzt

NMR-Spektroskopie von ¹²⁹Xe im Gehirn: Einfluss der Perfusion von grauer und weißer Substanz

Datenanalyse für die In-vivo-NMR-Spektroskopie

Vergleich des Informationsgehalts akustisch-evozierter Magnetfelder und elektrischer Potentiale

Quantitativer Vergleich der kognitiven Leistung von gesunden Probanden und Alzheimer-Patienten nach visueller Stimulation

SELMA-Workshop „Übertragung von eichpflichtigen Energiemessdaten über offene Kommunikationsnetze“

Bundestagswahlen mit PTB-geprüften Wahlgeräten

Eignung von PC für Online-Wahlen untersucht

Studie zu Regelungsmöglichkeiten für Jahrmarktspielgeräte

Internationale Zusammenarbeit

Mid Term Meeting des europäischen Projekts OPTIMAMM

Europäisches Projekt „Simulator for nibp“ gestartet

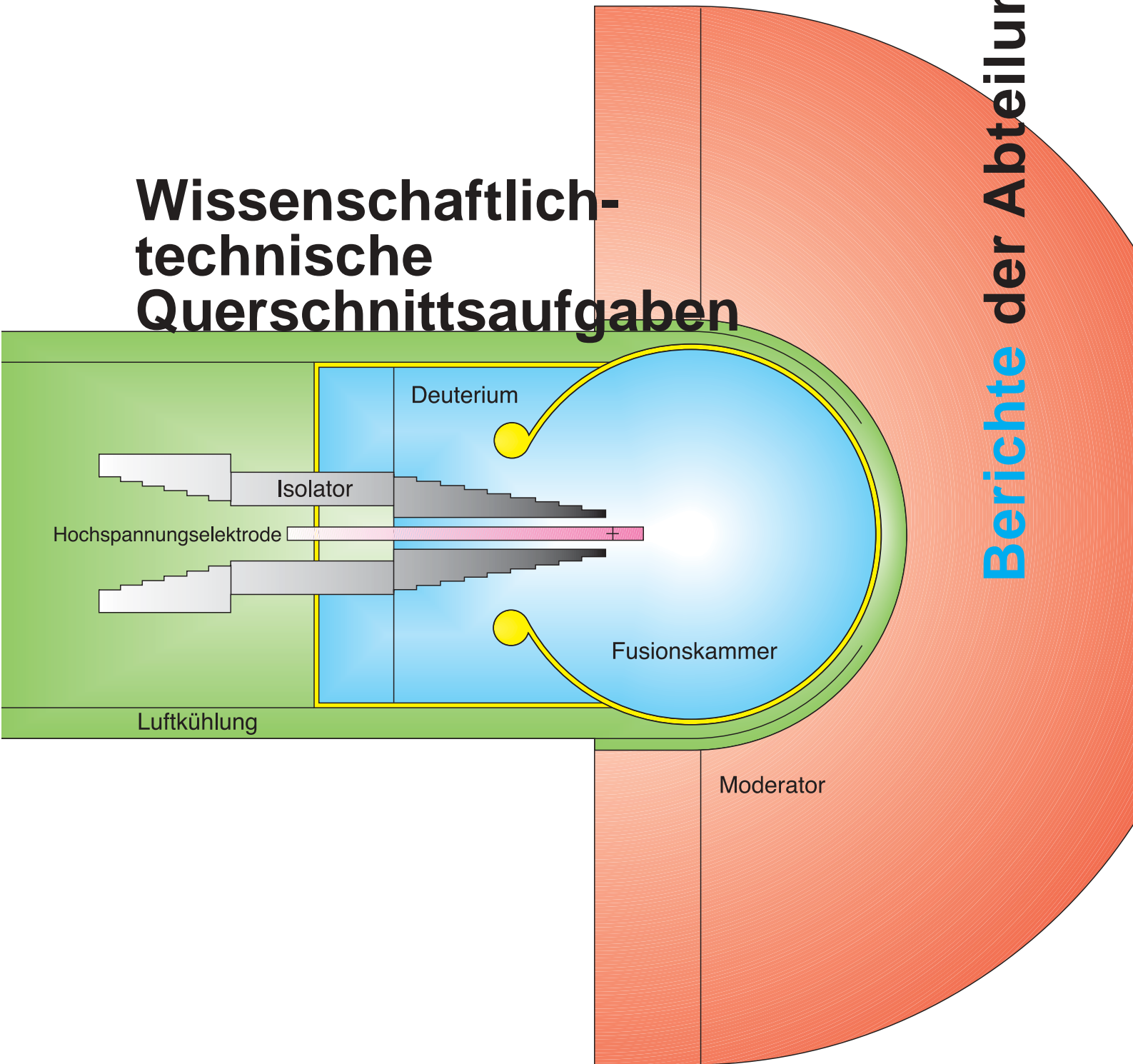
Europäisches Netzwerk „MID-Software“ erfolgreich gestartet

Europäisches Netzwerk „SofTools_MetroNet“ ins Leben gerufen

Allgemeine Nachrichten

Der 4. Ferrofluid-Workshop im Rahmen des von der DFG geförderten Forschungsschwerpunkts Ferrofluide fand vom 3. bis 5. Juli 2002 in der PTB Berlin mit 103 Teilnehmern statt.

Wissenschaftlich-technische Querschnittsaufgaben



Berichte der Abteilungen

Abteilung



Wissenschaft technische Mittel

Die *Abteilung Q* nimmt vielfältige Aufgaben in allen Arbeitsgebieten der PTB zum Nutzen von Wissenschaft und Wirtschaft, des Staates und seiner Bürger sowie in- und ausländischer Partnerorganisationen wahr. Innerhalb der PTB ist sie für alle Infrastrukturaufgaben mit wissenschaftlich-technischem Charakter zuständig. Dazu gehören insbesondere die Informationstechnologie, das Qualitätsmanagement und die Bibliotheken.

Grundlagen der Metrologie

Zu den Aufgaben der Abteilung gehören Grundlagenforschung im Bereich der Auswertung von Messungen sowie der experimentellen und theoretischen Festkörperphysik, aber auch die Vorbereitung von Internet-Anwendungen für die Metrologie. Ein Teil dieser Aufgaben wird in fachabteilungsübergreifenden Projekten bewältigt, andere durch externe Kooperationen oder durch Teilnahme an nationalen und internationalen Forschungsprogrammen bearbeitet. Aufgrund ihrer fachlichen Kompetenz werden die Mitarbeiter z. B. bei der Ermittlung von Messunsicherheiten oder bei Problemen im Bereich der theoretischen Physik häufig als Ratgeber von Kollegen aus anderen Abteilungen herangezogen.

Titelbild

Neutronengenerator mit Moderator
Prinzipbild eines ein- und ausschaltbaren Neutronengenerators zur Erzeugung freier Neutronen für die Prompt-(n, γ)-Spektrometrie. Die Neutronen werden bei der konzentrischen Fusion von beschleunigten Deuterium-Ionen in der Mitte der Edelstahlkugel erzeugt und haben eine mittlere kinetische Energie von 2,45 MeV. Ihre Thermalisierung soll in einem Moderator erfolgen, dessen Aufbau und Anordnung mithilfe von Monte-Carlo-Rechnungen hinsichtlich der verwendeten Materialien für die qualitative und quantitative Isotopenanalytik optimiert wird.

Dass die Welt durch das Internet immer näher zusammenrückt, konnte im Berichtsjahr eindrucksvoll demonstriert werden. Der erste in der PTB für Videokonferenzen eingerichtete Raum wurde in Betrieb genommen. Ausgestattet durch besondere akustische und lichttechnische Elemente, erlaubt diese Einrichtung jetzt Kleinkonferenzen mit bis zu vier Teilnehmern seitens der PTB. Wahlweise direkt per ISDN oder über das Internet übertragen, erreichen Bild und Ton fast Fernsehqualität. So wurde eine kostengünstige Möglichkeit geschaffen, weltweit Konferenzen, Workshops oder auch Besuche mit Blickkontakt der Beteiligten vor- und nachzubereiten. Damit ist die PTB als eines der ersten metrologischen Staatsinstitute in der Lage, diese moderne Infrastruktur zur Verfügung zu stellen.

Der BIPM-ISO-Guide to the *Expression of Uncertainty in Measurement* (GUM) gewinnt weiter an Akzeptanz. Eine Arbeitsgruppe des Europäischen Komitees für Normung (CEN) hat auf der Basis der Auswertung einer wesentlich in der PTB erarbeiteten und in Europa durchgeführten Umfrage festgestellt, dass der GUM mittlerweile bei der Ermittlung der Messunsicherheit beim Kalibrieren fast ausschließlich und beim Prüfen zunehmend verwendet wird. Dennoch ist es weiterhin notwendig, die Umsetzung des GUM in der Praxis zu fördern. Diesem Ziel dienen PTB-DIN-Seminare und die Beratung des DKD (*Deutscher Kalibrierdienst*) ebenso wie die Mitwirkung in internationalen Gremien. Ein neuer Schwerpunkt ist die Entwicklung von Verfahren für die praktische Ermittlung der Messunsicherheit in den Fällen, die vom GUM nicht explizit abgedeckt sind. Hierzu zählen nicht-lineare Modelle der Auswertung und Probleme mit mehreren Ausgangsgrößen. In der PTB werden dafür Algorithmen entwickelt und erprobt, die auf der Monte-Carlo-Methode basieren.

haftlich-

Die Schwerpunkte der theoretischen Arbeiten lagen im Berichtsjahr auf dem für die Metrologie so bedeutsamen Gebiet des Quanten-Hall-Effekts sowie auf Fragen im Zusammenhang mit Phasenübergängen. So begannen erste Untersuchungen mit dem Ziel, die thermodynamischen Eigenschaften des 1-Übergangs in flüssigem ^4He aus der atomaren Wechselwirkung der He-Atome herzuleiten. Dabei sollen mit Hilfe der Renormierungsgruppen-Methode die langreichweitigen Korrelationen am Phasenübergang mit den elementaren Wechselwirkungen in Verbindung gebracht werden.

Desweiteren konnte in einem durch finanzielle Mittel der *Deutschen Forschungsgemeinschaft* (DFG) unterstützten Projekts gezeigt werden, dass die wesentliche Physik des Übergangs vom Quanten-Hall-Zustand in den Isolator durch ein Gittermodell beschrieben werden kann, vorausgesetzt, es wird ein Parameterbereich gewählt, in dem die energetische Verschiebung der stromtragenden elektronischen Zustände nicht durch spezielle Eigenschaften des Gitters dominiert wird. Die für den Übergang vom Quanten-Hall-Zustand in den Isolator verantwortlichen mikroskopischen Prozesse sind allerdings nach wie vor noch unverständlich.

Die theoretische Beschreibung der Kernspin-Relaxationszeiten von wechselwirkenden zweidimensionalen Systemen in starken Magnetfeldern wurde unter Mitarbeit eines russischen Gastwissenschaftlers vom *Landau-Institut* in Chernogolovka weiterverfolgt. Kürzlich ist es gelungen, einen Ausdruck herzuleiten, der auch für elektronische Zustände in der Nähe eines vollständig gefüllten Landau-Niveaus strikt gültig ist. Die Hauptschwierigkeit bestand dabei darin, dass die Symmetrie des Grundzustands nicht mit der Symmetrie des Operators der Zeeman-Energie verträglich ist. Mit Hilfe der neu gewonnenen Beziehung sollte sich nun die beobachtete starke Abhängigkeit der Kernspin-Relaxationszeit vom jeweiligen elektronischen Zustand in der Nähe eines vollständig gefüllten Landau-Niveaus erklären lassen.

Während heutzutage die Darstellung und weltweite Weitergabe der Einheit des elektrischen Gleichstromwiderstands Ohm auf der Grundlage des Quanten-Hall-Effekts mit sehr geringer Unsicherheit möglich ist, steht die Rückführung der Impedanznormale auf den Wechselstrom-Quanten-Hall-Effekt noch bevor. Der Grund hierfür liegt in der bisher noch unzureichenden Präzision, mit der ein frequenzabhängiger quantisierter Hallwiderstand gemessen werden kann. Von theoretischer Seite werden bereits aus prinzipiellen Überlegungen Abweichungen vom Gleichstromwert h/e^2 erwartet. Die Frage, ob die im Experiment beobachteten Abweichungen den theoretisch Vorhersagen entsprechen oder ob zusätzliche externe Einflüsse wie kapazitive und induktive Ankopplungen die Ursachen dafür sind, wird derzeit durch Modellrechnungen untersucht. Es ergaben sich bereits klare Hinweise darauf, dass die spezielle Art der Unordnungspotentiale, welche die Bewegung der Ladungsträger in den Proben beeinflussen, zu unterschiedlichen Abweichungen führen. Besonders gering war die Diskrepanz des Wechselstrom-Hallwiderstands vom quantisierten Gleichstromwert dann, wenn das Unordnungspotential räumlich korreliert war (Bild 1).

Ein erster Schritt zur Neubestimmung der Avogadro-Konstante N_A wurde im Jahr 2002 mit einer erreichten relativen Unsicherheit von $2,9 \cdot 10^{-7}$ abgeschlossen (Näheres im Bericht der Abteilung 4). Eine weitere Verringerung der Messunsicherheit um ca. eine Größenordnung hängt davon ab, ob in zukünftigen Experimenten die molare Masse von Silizium mit einer relativen Unsicherheit von $5 \cdot 10^{-9}$ bestimmt werden kann. Dies ist die wesentliche Voraussetzung für eine Neudarstellung des Kilogramms auf der Basis der atomaren Si-Masseinheit. Eine Machbarkeits-

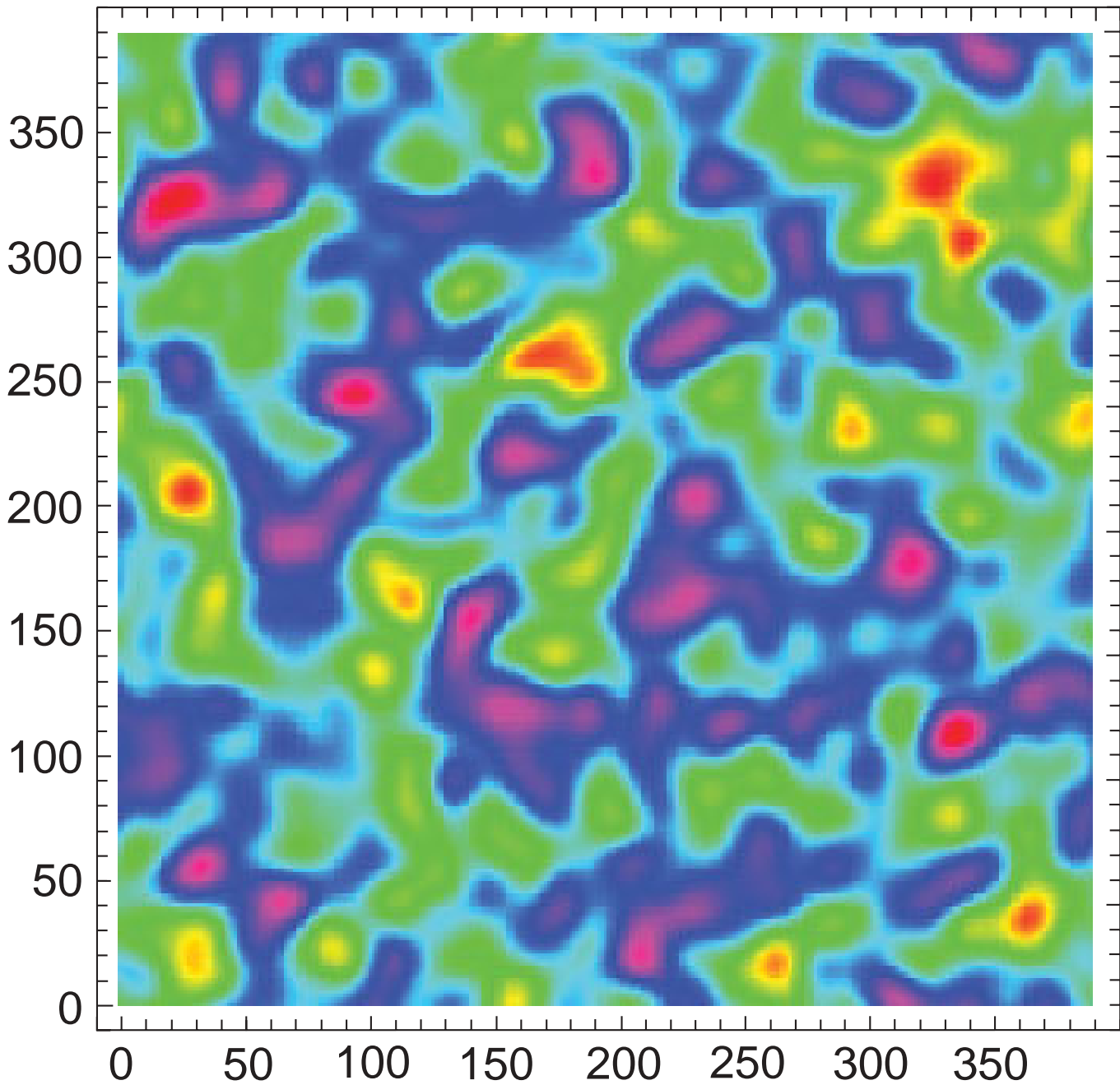


Bild 1: Korreliertes Potential

Eine Modellierung der elektrischen Potential-Landschaft, die ein Elektron auf seinem Weg durch ein quadratisches System sieht, das aus 384×384 Gitterpunkten besteht. Die Unordnungspotentiale sind räumlich Gauss-korreliert, rote Bereiche entsprechen Maxima, während violette Gebiete Potentialminima darstellen. Sowohl der Wechselstrom-Quanten-Hall-Effekt als auch der Übergang vom Quanten-Hall-Zustand in den Isolator werden wesentlich durch eine Variation der Korrelationslänge des Potentials beeinflusst.

studie soll klären, ob dieses Ziel mithilfe der Massen- und/oder der Prompt-(n, γ)-Spektrometrie erreicht werden kann.

Als Spin-off aus der Prompt (n, γ)-Isotopenanalytik wird ihre Anwendung für industrielle Zwecke erprobt. Dazu kommt ein in der Raumfahrttechnik entwickelter Neutronengenerator zum Einsatz. Im Rahmen eines Drittmittel-Projekts der Firma *Kali und Salze* wird der Einsatz zur On-line-Analyse von Salzströmen untertage erprobt. Alle Komponenten der Messtechnik erfüllen dabei die Anforderungen. Allerdings muss die Erzeugungsrate von Neutronen um rund einen Faktor 100 auf den ursprünglich vom Hersteller spezifizierten Nennwert erhöht werden. Dies soll im Rahmen eines neuen, vom BMWA und der mittelständischen Industrie geförderten Vorhabens innerhalb von drei Jahren erreicht werden.

In Kooperation mit dem GKSS-Forschungszentrum wird am Forschungsreaktor in Geesthacht das polarisierte Neutronen-Diffraktometer POLDI betrieben. Aus der Änderung der Polarisation eines monochromatischen Neutronenstrahls beim Durchgang durch ferromagnetische Proben wird die mittlere Domänengröße und die Vorzugsorientierung der Domänenmagnetisierung in Abhängigkeit von Magnetfeld und Temperatur bestimmt. Untersuchungen an der weichmagnetischen nanokristallinen Legierung NANOPERM zeigen, dass bei tiefen Temperaturen ($T < 30$ K) die magnetischen Momente in statistisch verteilten Richtungen ausfrieren. Dadurch wird der Magnetisierungsprozess durch Rotation der Domänenmagnetisierung zunehmend schwierig. Die Folge ist ein starkes Anwachsen der Koerzitivfeldstärke mit sinkender Temperatur (magnetisches Härten).

In einem zweiten Betriebsmodus steht am Messplatz ein Neutronenfeld zur Verfügung, das sich durch ein rein thermisches Spektrum (keine schnellen Neutronen, keine γ -Strahlung) auszeichnet. Dieses wurde hinsichtlich des absoluten Neutronenstroms und des Spektrums neu charakterisiert mit einer relativen Unsicherheiten von unter 5 %. Durch Einbau eines neuen Blendensystems lässt sich der Neutronenstrom um zwei Größenordnungen variieren und an die Erfordernisse der Neutronen-Dosimetrie anpassen.

Am Neutronenreflektometer TOREMA in der GKSS Geesthacht wurde eine komplexe Schichtstruktur auf GaAlAs/GaAs-Basis untersucht, aus der zurzeit in der PTB ein neuartiges Rauheitsnormal entwickelt wird. Es gelang, die Periodenlänge von drei übereinanderliegenden Schichtstrukturen zu bestimmen, wobei das größere Durchdringungsvermögen der Neutronen im Vergleich zu Röntgenstrahlung entscheidend war. Die ermittelten Periodenlängen wurden durch andere Methoden in der PTB mit Abweichung von weniger als 0,000 001 mm bestätigt.

Metrologie für die Gesellschaft

Im gesetzlich geregelten Bereich der Metrologie wurde an der weiteren Entwicklung der Europäischen Messgeräte-Richtlinie (*Measuring Instruments Directive* MID) intensiv gearbeitet. In monatlichen Sitzungen der Arbeitsgruppe *Messgeräte* im Rat der Europäischen Union wurden viele grundsätzliche Regelungen im Artikelteil der MID aufgrund von Änderungsvorschlägen des Europäischen Parlaments überarbeitet. Dabei waren die Stellungnahmen des Parlaments aus der ersten Lesung, des Wirtschafts- und Sozialausschusses und ein am 28. Mai im Amtsblatt veröffentlichter geänderter Vorschlag der Kommission zu berücksichtigen. Hierbei hat die Bezugnahme der MID auf normative Dokumente der OIML als Alternative zu harmonisierten Europäischen Normen eine aufwendige Diskussion erfordert, die zwischenzeitlich das Gesamtkonzept der Richtlinie in Frage gestellt hatte.

Als Folge der im zweiten Halbjahr sehr effizienten Diskussionen im Rat konnten frühere Vorbehalte einzelner Mitgliedstaaten zu den messgerätespezifischen Anhängen und den Konformitätsbewertungsverfahren zurückgenommen werden. Weiter bestehende Vorbehalte sind teilweise durch unterschiedliche nationale Interessen begründet. Für das Inverkehrbringen neuer Messgeräte werden künftig zwar keine Handelshemmnisse befürchtet, jedoch bedürfen die Regelungen für die Inbetriebnahme der Geräte zur Vermeidung nationaler Beschränkungen noch einer weiteren Erörterung. Da nicht alle Vorschläge des Parlaments vom Rat und der Kommission akzeptiert werden, ist eine einstimmige Entscheidung im Rat notwendig. Mit einer Annahme der Richtlinie durch das Parlament

und den Rat ist voraussichtlich im Jahr 2003 zu rechnen.

Als Koordinator für das gesetzliche Messwesen in Europa hat WELMEC (*European Cooperation in Legal Metrology*) nicht nur wesentliche Beiträge zu den technischen Anhängen der MID geleistet, sondern darüber hinaus in weiteren Arbeitsgruppen die Harmonisierung in verschiedenen Bereichen erheblich gefördert. Das Abkommen zur gegenseitigen Anerkennung von Prüfergebnissen wurde im Interesse Deutschlands auf weitere Messgerätearten erstreckt. Die von der PTB geleitete Arbeitsgruppe für Software konnte die Arbeiten aufgrund der Unterstützung durch ein EU-Projekt wesentlich beschleunigen. Auf der Sitzung des WELMEC-Komitees in Wien wurde eine Strategie für die Zukunft entwickelt, um die Zusammenarbeit der Benannten Stellen im gesetzlichen Messwesen bei der Anwendung der neuen Konformitätsbewertungsverfahren vorzubereiten.

In der *Internationalen Organisation für Gesetzliches Messwesen* (OIML) hat die PTB zur Erarbeitung neuer Empfehlungen beigetragen. Bei der diesjährigen Sitzung des *Internationalen Komitees* wurden der Entwurf für die neue Empfehlung „Automatic instruments for weighing road vehicles in motion, Part A“ und eine überarbeitete Version der IR 84 über Widerstandsthermometer verabschiedet. Als besonders schwierig hat sich die weitere Entwicklung eines Abkommens zur gegenseitigen Anerkennung von Prüfergebnissen (Mutual Acceptance Arrangement) im Rahmen des OIML-Zertifizierungssystems erwiesen. Ein internationales Seminar über die Entwicklung des gesetzlichen Messwesens bis zum Jahre 2020 hat die unterschiedlichen Ziele der Regionen aufgrund verschiedener wirtschaftlicher Entwicklungen aufgezeigt. Hierbei wurden die von der PTB vorgetragenen Szenarien als realistische Zukunftsorientierung bewertet.

Internationale Angelegenheiten

Wie in den vorausgehenden Abschnitten dargestellt, haben fast alle Aufgaben der Abteilung eine wesentliche internationale Dimension. Der Schwerpunkt internationaler Zusammenarbeit liegt jedoch im Bereich der Technischen Zusammenarbeit mit Entwicklungs- und Schwellenländern. Dreißig vom

Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (BMZ) finanzierte Projekte fördern den Abbau technischer Handelshemmnisse, den Aufbau von Systemen der Konformitätsbewertung mit den Komponenten *Mess-, Normen-, Prüf- und Qualitätswesen, Akkreditierung und Zertifizierung* (MNPQ) und *Umweltschutz*. Vier neue Projekte wurden konzipiert und Finanzmittel in Höhe von insgesamt 2,75 Mio. Euro für ihre Durchführung vom BMZ bewilligt. Projektpartner in mehr als zwanzig Ländern Asiens, Afrikas, Amerikas und Europas sind überwiegend staatliche, für den MNPQ-Bereich zuständige Institutionen und Organisationen

Ein hervorragendes Ergebnis ist die Akkreditierung von Kalibrierlaboratorien der Projektpartner in Argentinien, Chile, Rumänien, Thailand und Uruguay durch den DKD. Sie verschafft den Kalibrierzertifikaten dieser Laboratorien eine weite internationale Akzeptanz. Weitere Laboratorien wurden mit Projektunterstützung auf die Akkreditierung vorbereitet. Quantitative Angaben und Kurzberichte über einige Projekte sind unter „In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung“ zu finden.

Die Erfahrungen und Erfolge in der Zusammenarbeit mit Entwicklungsländern führen dazu, dass die PTB verstärkt in Aktivitäten internationaler Organisationen eingebunden wird. So wurde sie um Mitwirkung bei der Konzeption und Durchführung eines Seminars für Entwicklungsländer im Rahmen der gemeinsam von der *International Laboratory Accreditation Cooperation* (ILAC) und dem *International Accreditation Forum* (IAF) veranstalteten Konferenz über Akkreditierungsfragen in Berlin im September 2002 gebeten. Anschließend vertiefende Seminare und Fortbildungsprogramme wurden von der PTB gemeinsam mit dem *National Institute of Standards and Technology* (NIST), USA, durchgeführt. Zur Konferenz selbst wurde die PTB mit einem Vortrag zum Thema Unterstützung für Entwicklungsländer eingeladen. Bei dieser Gelegenheit wurde nicht nur über Projekte der PTB, sondern insbesondere auch über die Technische Zusammenarbeit der Welthandelsorganisation, WTO, berichtet. Konkrete Schritte einer Kooperation zwischen der PTB und der WTO wurden vereinbart und sollen ab 2003 umgesetzt werden.

Eine generelle Problematik internationaler Fachorganisationen besteht darin, dass die fachliche Arbeit und die Ergebnisse den Stand der Industrienationen widerspiegeln und nicht ohne Abstriche auf Entwicklungsländer übertragen werden können. Diese Erfahrung hat auch die *Internationale Organisation für Gesetzliches Messwesen* (OIML) gemacht und bereits vor Jahren ein spezielles Beratungsgremium für Entwicklungsländer gegründet. Um dessen Arbeit praxisnäher zu gestalten, möchte man auf die Erfahrungen und

Bild 2: Bei Teilnehmern aus aller Welt sind gute Übersetzungen Voraussetzung für den Erfolg von Tagungen: Hier während eines Seminars für Entwicklungsländer mit PTB-Beteiligung im Herbst 2002 in Berlin mit Themen zur Akkreditierung und Zertifizierung.



Möglichkeiten der PTB zurückgreifen und hat deshalb den Leiter des zuständigen Fachbereichs eingeladen, als Mitglied einer speziellen Task Force daran mitzuwirken. Konkrete Vorschläge der PTB wurden bei einer Sitzung in Frankreich vorgestellt. Sie sehen u. a. die Einbeziehung von Vertretern der OIML in Projektaktivitäten der PTB zum beiderseitigen Nutzen vor.

Zur *First Middle East Metrology Conference* wurde ein Vertreter der PTB nach Bahrain eingeladen. Die Organisatoren dieser für die Golfregion wichtigen Veranstaltung waren nicht nur an einem Vortrag interessiert, son-

dern suchten auch den Rat für den Ausbau der Metrologie in Bahrain und in der Region. Bei dieser Gelegenheit wurden Kontakte zu Vertretern Saudi-Arabiens aufgenommen, die an einer Beratung für den Bau neuer Metrologielaboratorien durch die PTB interessiert sind. Die notwendigen vertraglichen Vereinbarungen werden zurzeit vorbereitet.

Qualitätsmanagement

Am Ausbau des *Qualitätsmanagement(QM)-Systems* der PTB und seiner internationalen Akzeptanz wurde kontinuierlich weitergearbeitet. Auf internationalen Tagungen in den USA (NCSL), der regionalen Metrologieorganisationen in Afrika (SADCMET) und der *Euro-asiatischen Zusammenarbeit nationaler Metrologieinstitutionen* (COOMET) sowie auf

nationalen Workshops wurde das integrierte QM-System der PTB vorgestellt. Die Betonung der technischen Kompetenz im Rahmen des QM-Systems erhielt breite Zustimmung und weltweite Unterstützung. Durch das QM-System werden u. a. die in der BIPM-Datenbank international angebotenen Mess- und Kalibriermöglichkeiten der PTB abgesichert. Damit wird auch zukünftig die grenzüberschreitende Anerkennung der von der PTB ausgestellten Ergebnisberichte sichergestellt.

Für die *Abteilung Q* wurden im Berichtsjahr gezielte Maßnahmen zur Verbesserung der Umsetzung und zur Konsolidierung des QM-Systems durchgeführt. Hierzu zählten Schulungsveranstaltungen und Workshops zu speziellen Themen sowie die Überarbeitung des QM-Handbuchs der *Abteilung Q*. Insbesondere wurde die Qualitätspolitik der Abteilung gemeinsam diskutiert und neu formuliert und wissenschaftliche Redlichkeit, Kundenorientierung, Effizienz und Pragmatismus und die Motivation der Mitarbeiter als wesentliche Qualitätsziele festgelegt.

Die internen Audits der *Abteilung Q* wurden erstmals in Form von vertikalen Verfahrensaudits ausgesuchter Teilaufgaben der Abteilung durchgeführt. Dadurch konnte eine bessere Akzeptanz bei den Mitarbeitern und eine Verbesserung der Umsetzung des QM-Systems erreicht werden. Darüber hinaus wurde das abteilungsinterne Verfahren zur Mitarbeiterqualifikation neu gestaltet und von einer angebotsorientierten in eine bedarfsorientierte Qualifikation überführt.

In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

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

Grundlagen der Metrologie

Auswertung internationaler Ringvergleiche

Die PTB ist im Rahmen des CIPM MRA (Mutual Recognition Arrangement) in zahlreiche Ringvergleiche eingebunden und an Entwicklung und Festlegung eines international einheitlich zu verwendenden Auswerteverfahrens beteiligt.

Messunsicherheiten für mehr als eine Messgröße mit der Monte-Carlo-Methode

Die Ermittlung der Messunsicherheit für mehr als eine Ausgangsgröße führt auf ein Gleichungssystem, das den Vektor Eingangsgrößen als Produkt der Designmatrix mit dem Vektor Ausgangsgrößen darstellt. Die Monte-Carlo-Methode löst dieses Problem auch dann, wenn nicht nur den Eingangsgrößen, sondern auch den Elementen der Designmatrix Unsicherheiten beigeordnet sind.

Phasenübergang zur Suprafluidität in flüssigem ^4He

Mit Hilfe eines exakten Renormierungsgruppenverfahrens werden die thermodynamischen Eigenschaften des 1-Übergangs in flüssigem ^4He berechnet. Ausgangspunkt ist die atomare Wechselwirkung der He-Atome.

Ein-Loch-Dynamik im t-J-Modell

Das Quasiteilchengewicht eines Lochs in einem antiferromagnetischen Hintergrund wurde in der quasiklassischen Näherung berechnet; es verschwindet für Raumdimension Eins und ist endlich in zwei Dimensionen.

Spinrelaxation in Quanten-Hall-Systemen

Es wurde ein Ausdruck für die dynamische Suszeptibilität eines Quanten-Hall-Systems für Füllfaktoren in der Nähe von Eins hergeleitet, der auch in Anwesenheit einer Zeeman-Energie gültig ist.

Einfluss räumlich korrelierter Unordnungspotentiale auf die Quantisierung des Wechselstrom-Quanten-Hall-Effekts

Modellrechnungen zum Wechselstrom-Quanten-Hall-Effekt haben ergeben, dass die beobachteten Abweichungen vom quantisierten Gleichstromwert h/e^2 von der räumlichen Korrelation der Unordnungspotentiale abhängen.

Metall-Isolator-Übergang in ungeordneten zweidimensionalen Systemen

Ungeordnete zweidimensionale Systeme können einen Metall-Isolator-Übergang aufweisen, wenn die Abstandsabhängigkeit der elektronischen Transferterme einem Potenzgesetz folgt. Die kritischen Eigenschaften wurden numerisch berechnet.

Metrologie für die Gesellschaft

Vollversammlung für das Eichwesen

In der Vollversammlung wurde am 13. und 14. November 2002 in der PTB über aktuelle Entwicklungen im nationalen und europäischen gesetzlichen Messwesen vorgetragen und diskutiert.

Auffälligkeiten im gesetzlichen Messwesen

Die zentrale Ansprechstelle für Auffälligkeiten im gesetzlichen Messwesen hat durch ihre Unterstützung der Fachlaboratorien dazu beigetragen, einheitliche und schnelle Lösungen bei technischen Problemfällen im Zulassungsbereich zu finden.

Datenbank für Bauartzulassungen der PTB

Die Inbetriebnahme der PTB-Datenbank für Bauartzulassungen PTB (MITAC) erleichtert und verbessert die Zugriffsmöglichkeiten der Eichbehörden und der Prüfstellen auf Zulassungsdokumente.

PTB-Anforderungen an elektronische und softwaregesteuerte Messgeräte

Durch die Verabschiedung der PTB-A 50.7 reagiert die PTB auf die Weiterentwicklung der Technik und die neuen Herausforderungen durch die Liberalisierung des Energiemarkts.

Staatlich anerkannte Prüfstellen für Messgeräte für Elektrizität, Gas, Wasser und Wärme

Statistische Angaben zur Anzahl der Prüfstellen, zu den Befugnissen und zum leitenden Personal zeigen nur geringe Änderungen im Vergleich zum Vorjahr.

Konformitätsbewertungsverfahren nach Modul H1

Für die Durchführung des Konformitätsbewertungsverfahrens nach Modul H1 der *Europäischen Messgeräte-Richtlinie* (MID) wurden erste Vorbereitungen getroffen.

Zertifizierungsstelle für Messgeräte

Zur Vorbereitung auf die *Europäische Messgeräte-Richtlinie* (MID) wurde der Probebetrieb einer Zertifizierungsstelle für Baumusterprüfungen und die Anerkennung von QM-Systemen durchgeführt.

Internationale Angelegenheiten

Die Technische Zusammenarbeit in Zahlen

Im Berichtsjahr wurden 15 Länder in vier Kontinenten durch 24 bilaterale Projekte beim Aufbau ihrer MNPQ-Infrastruktur unterstützt. Etwa 110 Fachkräften aus 26 Ländern wurde eine Fortbildung in Fachinstituten in Deutschland und anderen Ländern ermöglicht; mehr als 1000 Teilnehmer aus 37 Ländern konnten an speziellen Fortbildungsseminaren durch Projektförderungen teilnehmen.

Neues Projekt für Entwicklungs- und Transformationsländer

Vom Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (BMZ) wurden für ein dreijähriges Projekt zur Förderung des MNPQ-Wesens in Entwicklungs- und Transformationsländern 1 Mio. Euro bereitgestellt, um nationale und regionale MNPQ-Organisationen dabei zu unterstützen, nachfrageorientierte Dienstleistungen anzubieten.

Stärkung regionaler Strukturen der Metrologie und der Akkreditierung in Lateinamerika

Ziel dieses neuen Projekts ist die Verbesserung der Möglichkeiten für Konformitätsbewertung, insbesondere im Umwelt- und Lebensmittelbereich, durch eine Förderung regionaler Metrologie- und Akkreditierungsorganisationen.

Thailand – ein weiterer Knoten im internationalen Netzwerk der Metrologie

Seit 1998 unterstützt die PTB Thailand bei der Entwicklung eines bedarfsorientierten messtechnischen Dienstleistungssystems; Laboratorien des *National Institute of Metrology* sind durch den *Deutschen Kalibrierdienst* im Rahmen der Projektarbeit akkreditiert worden.

Unterstützung der Metrologie in Mittel- und Osteuropa

Besondere Schwerpunkte waren Beratungen und Fortbildung für die angestrebte Harmonisierung nationaler Regelungen und Gesetze im MNPQ-Bereich mit europäischen und internationalen Vorschriften; die Mitgliedschaft der PTB in COOMET führte zu einer Intensivierung dieser Aktivitäten.

Seminar „Messunsicherheit“ in der Ukraine

Der Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen findet auch in den osteuropäischen Ländern zunehmende Verbreitung; dem erforderlichen Beratungsbedarf zu seiner Anwendung in der Praxis hat die PTB mit einem Seminar in Charkov entsprochen.

Infrastruktur

Wissenschaftliche Bibliotheken

Das Angebot an Online-Diensten im PTB-Intranet konnte um 33 Zeitschriftentitel erweitert werden; zum Fachinformationssystem PTB-InterHost wurden der Profilsuchdienst (SDI) und die Komponente zur Selbstanmeldung und Datenpflege für Endnutzer ergänzt.

Informationstechnologie

Datennetz der PTB leistungsfähiger und sicherer

Die Installation neuer Netzwerktechnik und ausfallsicherer Firewall-Systeme hat die Leistungsfähigkeit und Ausfallsicherheit des *Lokalen Datennetzes* der PTB und seinen Schutz gegen Angriffe von außen weiter erhöht.

Optimierte Brandmeldetechnik

Die Brandmeldetechnik wurde durch Vernetzung der vorhandenen Brandmeldeanlagen optimiert.

Arbeitsplatzrechner jetzt zentral administriert

Die Arbeitsplatzrechner im lokalen Netz der PTB werden bei Neubeschaffung mit Windows XP ausgestattet und während ihres ganzen Lebenszyklus zentral administriert.

Lotus-System mit höherer Verfügbarkeit

Der bisherige Lotus-Server wurde durch ein ausfallsicheres Cluster ersetzt und so die Verfügbarkeit des Systems als Voraussetzung für seinen flächendeckenden Einsatz entscheidend erhöht.

Leistungsfähigerer Verzeichnisdienst vorbereitet

Mit dem Abschluss der Vorarbeiten zur Einführung der Netware-Version 6 wurden die Voraussetzungen für einen leistungsfähigeren Verzeichnisdienst mit offenem Zugangsprotokoll geschaffen.

Datenbank-Infrastruktur der PTB jetzt auch Basis von SAP R/3

Auf Basis der Datenbank-Infrastruktur mit einer Verfügbarkeit von ungefähr 99 % wurde nach aufwendiger Datenübernahme aus der bisherigen Anwendung der Produktivbetrieb des Unternehmensplanungssystems SAP R/3 aufgenommen.

Der Deutsche dienst

Im Berichtsjahr wurde die turnusmäßige Evaluierung (4-Jahresrhythmus) des DKD von der EA (*European co-operation for Accreditation*) durchgeführt. Über diese durch europäische Partnerinstitutionen durchgeführten Begutachtungen der angeschlossenen Akkreditierungsstellen soll die Äquivalenz innerhalb des europäischen Systems bestätigt werden. Die mit positivem Ergebnis abgeschlossene Evaluierung bestätigte sowohl die gute Funktionalität des Systems als auch die hohe Kompetenz der DKD-Begutachter. Die konstruktiven Hinweise der Evaluatoren wurden aufgegriffen. Zur Erfüllung der neuen Norm für Akkreditierungsstellen (ISO 17 011) werden hinsichtlich der Forderungen zur Unabhängigkeit noch organisatorische Anpassungen notwendig sein, ohne allerdings das im Jahre 2001 installierte System grundlegend zu verändern. Die Arbeit des DKD-Expertenremiums hat ihren positiven Beitrag dazu geleistet, dass die enge Verbindung zwischen PTB und DKD erhalten bleibt.

Ein wesentlicher Schwerpunkt der Arbeiten im abgelaufenen Jahr betraf die Umstellung auf die für akkreditierte Kalibrierlaboratorien allein gültige Norm DIN EN ISO/IEC 17 025 ab 1.1.2003. Einerseits wurde der Begutachtungsrahmen der Überwachungsbesuche umfangreicher, andererseits ergab sich durch Verzögerungen (späte Einreichung der notwendigen Dokumentation) auf Seiten der Kalibrierlaboratorien ein Besuchsstau zum Ende des Jahres hin. Alle nach DIN EN 45 001 ausgesprochenen Akkreditierungen haben mit Wirkung vom 1.1.2003 ihre Gültigkeit verloren. Noch nicht umgestellte DKD-Laboratorien sind damit faktisch bis zur Umstellung ausgesetzt.

Infolge der personellen Veränderung in der Leitung der DKD-Akkreditierungsstelle wurden auch die Prioritäten in der Gremienarbeit neu festgelegt. Zukünftig ist die Zusammenarbeit mit dem *Deutschen Akkreditierungsrat* (DAR) von zentraler Bedeutung, über den grundsätzlich die weitere Vertretung auf internationaler Ebene erfolgt. In den für den DKD wichtigen Gremien „Laboratorien“ und „MRA“ der EA wird direkt mitgearbeitet.

Mit dem neu hinzugekommenen Fachausschuss *Drehmoment* hat sich im Jahre 2002 die Zahl dieser Gremien auf zehn erhöht. Als Hilfestellung für die DKD-Kalibrierlaboratorien wurde ein Arbeitskreis *Messunsicherheit* gegründet, der 2003 in einen DKD-Fachausschuss überführt werden soll.

Aufgaben des DKD in der PTB

In Deutschland wird die PTB auch zukünftig zentraler Ansprechpartner für die Industrie in Fragen der Messtechnik sein. Die Weitergabe der Einheiten wird durch die Akkreditierungen des DKD größtenteils auf die Ebene der industriellen Messtechnik verlagert. Diese Entlastung ermöglicht es den PTB-Laboratorien, sich auf hochgenaue Kalibrierungen zu beschränken und Forschungsarbeiten in den Vordergrund zu stellen.

Die Einflussnahme des *Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit* und insbesondere der PTB auf die Qualität der externen Kalibrierungen ist über den DKD gegeben. Die akkreditierten Kalibrierlaboratorien werden fachkompetent überwacht und in den wichtigsten nationalen und internationalen Gremien durch den DKD vertreten, wobei die Ausrichtung der messtechnischen Anforderungen

he Kalibrier-

innerhalb der PTB abgestimmt wird. Die Orientierung an den Interessen der beteiligten Wirtschaftskreise wird durch den Beirat und über die Fachausschüsse sichergestellt.

Vor dem Hintergrund der Globalisierung der stark exportorientierten deutschen Wirtschaft soll auch zukünftig gewährleistet sein, dass DKD-Kalibrierscheine nicht nur europaweit, sondern weltweit anerkannt werden.

Da die Firmenstrukturen der messtechnischen Unternehmen und auch der DKD-Laboratorien überwiegend im Bereich *kleine und mittlere Unternehmen* (KMU) angesiedelt sind, besteht weiterhin die Notwendigkeit der Vertretung durch eine von privatwirtschaftlichen Interessen unabhängige Stelle, für die Fachkompetenz in der Messtechnik an erster Stelle steht.

Der *Deutsche Kalibrierdienst* (DKD) wird auch weiterhin einen wesentlichen Bestandteil des Technologietransfers auf dem Gebiet der Metrologie in Deutschland darstellen. Sollte ein zentrales deutsches Akkreditierungssystem einzurichten sein, wird sich der DKD dem nicht verschließen, dabei jedoch die Funktion, als staatliche Stelle die Interessen von Messtechnik und KMU in Einklang zu bringen und zu wahren, nicht aus den Augen verlieren.

PTB

Die Anlagen

Kuratorium

Mitglieder

Präsident des Kuratoriums

Ministerialdirektor Dr. jur. Eike Röhling
Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit,
Berlin

Stellvertretender Präsident des Kuratoriums

Prof. Dr. h. c. Dr. rer. nat. Klaus von Klitzing
Direktor am Max-Planck-Institut für Festkörperforschung, Stuttgart

Dr.-Ing. Axel Anderlohr
Zentralbereich Ingenieurtechnik
BASF AG, Ludwigshafen

Prof. Dr. rer. nat. Gisela Anton
Physikalisches Institut IV der Universität Erlangen

Prof. Dr.-Ing. habil. Monika Auweter-Kurtz
Institut für Raumfahrtssysteme
Universität Stuttgart

Prof. Dr. Christian Paul Beckervordersandforth
Direktor Ruhrgas AG

Prof. Dr. h. c. mult. Dr. phil. Peter Fulde
Direktor am Max-Planck-Institut für
Physik Komplexer Systeme, Dresden

Dipl.-Ing. Helmwart Fülles
Geschäftsführer
National Rejectors Inc. GmbH, Buxtehude

Prof. Dr.-Ing. Eveline Gottzein
Deutsche Aerospace AG, München

Prof. Dr. h. c. Dr. Manfred Grasserbauer
Direktor des Institute for Reference Materials and
Measurements, Geel (Belgien)

Prof. Dr. rer. nat. Axel Haase
Lehrstuhl „Experimentelle Physik V“,
Universität Würzburg

Prof. Dr. rer. nat. Theodor W. Hänsch
Sektion Physik
Ludwig-Maximilians-Universität, München

Dipl.-Ing. Herbert Kircher
Direktor
IBM-Entwicklungslaboratorium, Böblingen

Prof. Dr. rer. nat. Jürgen Mlynek
Präsident der Humboldt-Universität, Berlin

Prof. Dr.-Ing. Volker Pilz
Bayer AG, Leverkusen

Prof. Dr. rer. nat. Frank Pobell
Wissenschaftlicher Direktor
Forschungszentrum Rossendorf

Dr.-Ing. habil. Joachim Scheuren
Geschäftsführer der Müller-BBM, Planegg

Prof. Dr. sc. nat. Joachim P. Schoenes
Technische Universität, Braunschweig

Dr. rer. nat. Wolfgang Schwitz
Direktor des Eidgenössischen Amtes für
Messwesen, Bern-Wabern (Schweiz)

Dr. rer. nat. Thomas Sesselmann
Geschäftsführer
Dr. Johannes Heidenhain GmbH, Traunreut

Dr. rer. nat. Augustin Siegel
Carl Zeiss, Oberkochen

Ind.-Kfm. Peter von Siemens
Mitglied des Aufsichtsrats
Siemens AG, München

Dr.-Ing. Peter Maximilian Stehle
Mitglied der Unternehmensleitung
Freudenberg und Co., Weinheim

Prof. Dr. h. c. Dr. med. Günter Stock
Mitglied des Vorstandes der Schering AG, Berlin

Prof. Dr. phil. Hans Tiziani
Institut für Technische Optik, Universität Stuttgart

**Prof. Dr.-Ing. E. h. mult. Dr.-Ing. Hans Kurt
Tönshoff**
Institut für Fertigungstechnik & Spanende Werkzeugmaschinen, Universität Hannover

Prof. Dr. h. c. Dr. rer. nat. Joachim Treusch
Vorsitzender des Vorstandes
Forschungszentrum Jülich GmbH, Jülich

Dr. rer. nat. Martin Winterkorn
Mitglied des Konzernvorstandes
Volkswagen AG, Wolfsburg

Dr.-Ing. Klaus Rudolf Wurster
Geschäftsführer Bizerba GmbH & Co. KG,
Balingen

Ehrenkurator

**Prof. Dr. h. c. mult. Dr. rer. nat. Heinz-Georg
Wagner**
Institut für Physikalische Chemie,
Universität Göttingen

Ja

Jahresbericht im Internet

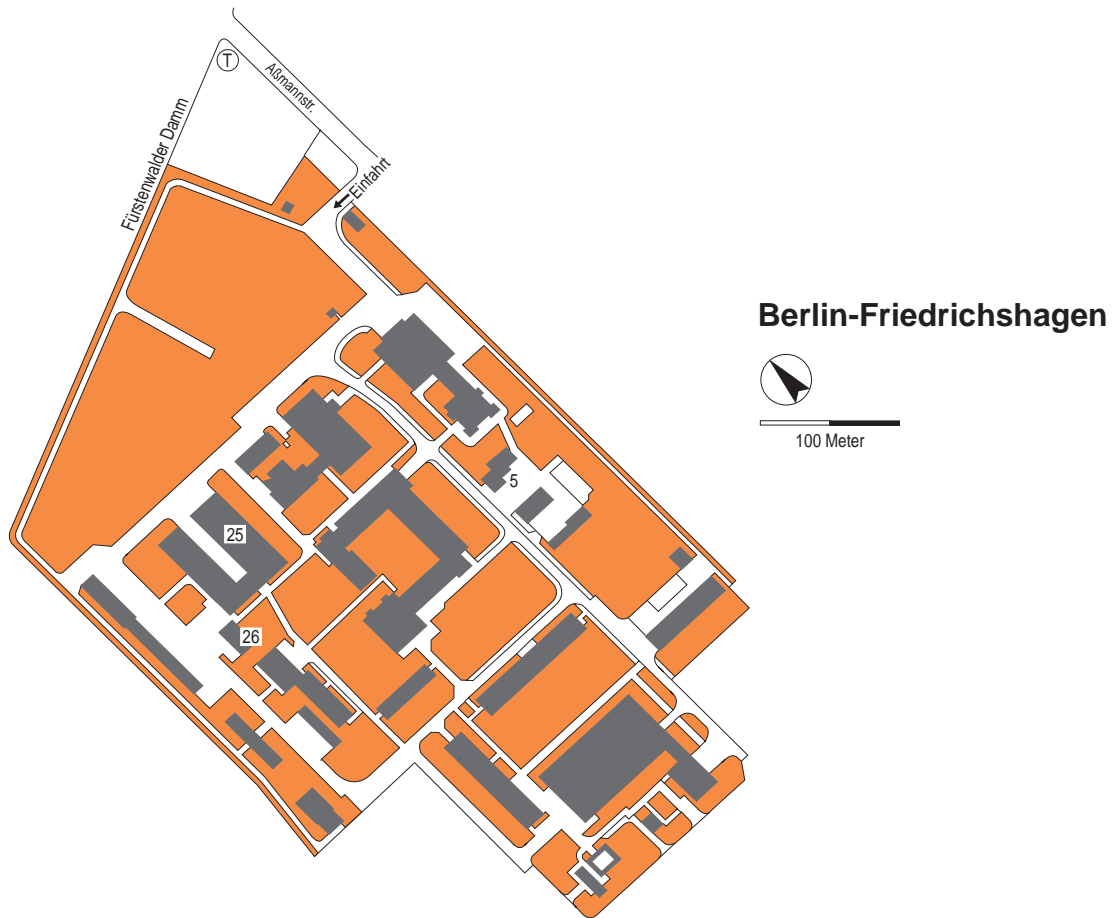
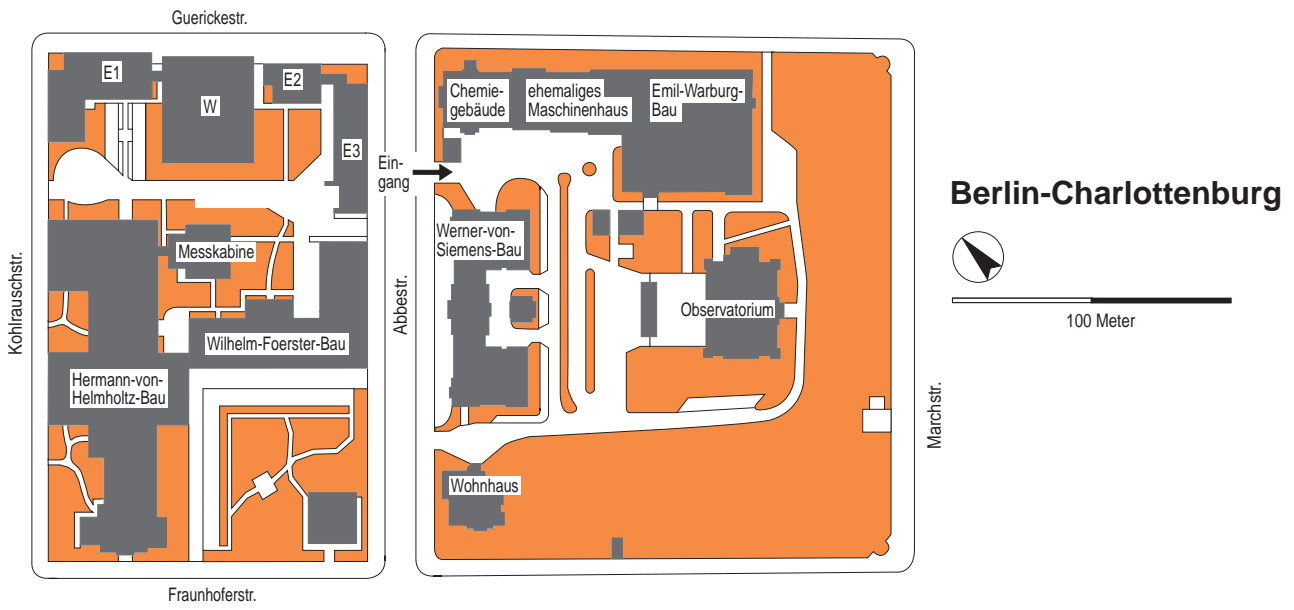
Der gedruckte Teil des Jahresberichts liefert Ihnen in überschaubarer Form einen Überblick über die PTB im Jahre 2002. Den kompletten Jahresbericht mit Nachrichten und speziellen Listen finden Sie auf den Internetseiten der PTB (unter www.ptb.de im Bereich „Publikationen“).

Außerdem führen wir Sie von dort zur Datenbank Publica, in der bibliographische Angaben zu sämtlichen Veröffentlichungen und Vorträgen von PTB-Mitarbeitern gesammelt werden, und liefern Ihnen zu jeder Fachabteilung der PTB zusätzlich einen Auszug aus dieser Datenbank (Veröffentlichungen des Jahres 2002).

Inhalt:

- **Vorwort**
- **Nachrichten des Jahres**
- **Aus den Abteilungen**
 - Abteilungsleiterberichte
 - Nachrichten
 - Tätigkeitsbereiche
 - Forschungsvorhaben
 - Kooperationen
 - Kalibrierungen/Prüfungen/Zulassungen
 - Internationale Vergleichsmessungen
 - Veröffentlichungen – Auszug aus Publica
- **Zahlen und Fakten**
 - Aktuelle Statistiken
- **Anhang**
 - Nationale Normungsgremien
 - Internationale Normungsgremien
 - Seminare/Workshops/Konferenzen
 - Kolloquien
 - Externe Lehrtätigkeit
 - Gäste/Gastwissenschaftler
- **Datenbank Publica**
 - Veröffentlichungen

Geländeplan Berlin



Gerätebau
 Haus 4
 Haus 25
 Haus 26

Technische Dienste
 Haus 5