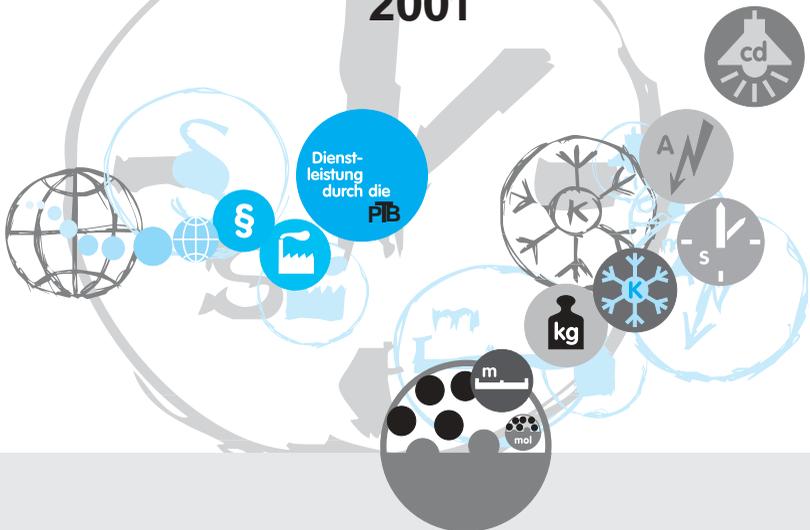


# Physikalisch- Technische Bundesanstalt

Braunschweig und Berlin

## Jahresbericht 2001



# Vorwort

Wieder ist es an der Zeit, Rechenschaft abzugeben über die Arbeit und Ergebnisse eines vergangenen Jahres. Wir tun dies gerne und blicken mit bescheidenem Stolz auf das Erreichte. Wenn es mir angesichts der schrecklichen Ereignisse des 11. Septembers auch nicht leicht aus der Feder geht, so stelle ich doch fest: 2001 war für die PTB ein gutes Jahr! Davon gibt, so hoffe ich, der vorliegende Jahresbericht Zeugnis.

Im Rahmen der Vorbereitung auf die anstehende Evaluation der PTB durch eine vom *Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie* berufene internationale Expertenkommission haben wir unsere Arbeitsgebiete und strategischen Ziele intensiv diskutiert und überarbeitet.

Das Arbeitsgebiet „Grundlagen der Metrologie“ umfasst nun sämtliche Tätigkeiten zur Darstellung, Bewahrung und Weitergabe der SI-Einheiten und der gesetzlichen Zeit. „Förderung der Wirtschaft durch Forschung und Entwicklung, Kalibrierung, Prüfung und Zulassung“ gehört zum satzungsgemäßen Auftrag der PTB und ist in dem Arbeitsgebiet „Metrologie für die Wirtschaft“ zusammengefasst. Der Bereich „Metrologie für die Gesellschaft“ beinhaltet die gesetzlichen Aufgaben betreffend den Schutz des Verbrauchers und der arbeitenden Bevölkerung im beruflichen Umfeld, den Erhalt und die Wiederherstellung der Gesundheit, die persönliche und industrielle Sicherheit und nicht zuletzt den Schutz von Natur und Umwelt. Dem Arbeitsgebiet „Internationale Angelegenheiten“ sind zugeordnet die vielfältigen Kooperationen der PTB zur Etablierung und Sicherstellung der Einheitlichkeit des Messwesens als Beitrag zum Abbau nicht tarifärer

Handelshemmnisse, die wesentliche Mitarbeit in den internationalen Metrologieorganisationen und Normungsgremien und unsere Beiträge zur technischen Zusammenarbeit. Diese vier, sich in der praktischen Arbeit sehr stark überschneidenden Arbeitsgebiete, die nachfolgend im Jahresbericht etwas ausführlicher beschrieben werden, decken die bundeshoheitlichen Aufgaben im Messwesen weitestgehend ab. Die gemeinsame Verantwortlichkeit und Bearbeitung dieser Aufgaben in einer Institution gewährleistet die optimale Nutzung der benötigten apparativen und personellen Ressourcen und begründet den Anspruch der PTB, international anerkanntes Kompetenzzentrum für die Metrologie zu sein. Der Anteil der Ressourcen für Forschung und Entwicklung über alle vier Arbeitsgebiete liegt zwischen 60 % und 65 %, und dieser Umfang wird auch in Zukunft für die kompetente Erfüllung des staatlichen Auftrags unabdingbar sein.

Wir erhoffen uns von der bevorstehenden Evaluation, dass dort die Diskussion über die Arbeitsgebiete der PTB, die strategischen Ziele und Rahmenbedingungen konstruktiv fortgeführt wird, um die Zukunftsfähigkeit der PTB – zum Nutzen von Wirtschaft, Wissenschaft und Gesellschaft – zu sichern.

Ich wünsche Ihnen eine interessante und anregende, in jedem Fall angenehme Lektüre unseres Jahresberichts 2001. Der gedruckte Teil des Jahresberichts liefert einen ersten Überblick über die PTB im Jahr 2001. Wer nach fachspezifischen Details sucht, findet den vollständigen Jahresbericht im Internet auf unserer Homepage ([www.ptb.de](http://www.ptb.de)).

Ernst O. Göbel



# Foreword

Again the time has come to give account for the work and results of a year that has elapsed. We do this willingly, and with unassuming pride we look at what we have achieved. Although it doesn't come easy to me, in view of the terrible events of the 11th of September, I do have to say that the year 2001 was a good one for the PTB. And this, I hope, will be reflected by our Annual Report.

Within the scope of the preparations for the forthcoming evaluation of the PTB by an international expert commission appointed by the *Federal Ministry for Economics and Technology*, we have discussed in depth, and revised, both our areas of work and our strategic objectives.

The area of work "Bases of metrology" now covers all activities related to the realization, maintenance and dissemination of the SI units and of legal time. "Support for economy through research and development, calibration, testing and approval" is part of the statutory task of the PTB and subsumed under "Metrology for economy". The area of "Metrology for society" deals with the legal tasks as regards the protection of the consumer and of the active population in its working environment, conservation and restoration of health, personal and industrial safety and not least conservation of nature and environmental protection. The area of "International affairs" encompasses the various cooperations of the PTB aiming to establish and safeguard uniformity of metrology

as a contribution to removing non-tariff barriers to trade, substantial cooperation in the international metrology organizations and standardization bodies, and our contributions to technical cooperation. These four areas of work which in practice overlap hugely and are dealt with in the Annual Report in more detail, largely cover the sovereign tasks in the field of metrology. The fact that one institution is responsible for, and deals with, these tasks ensures optimum use of equipment and personnel and underscores the claim of the PTB to being an internationally established competence centre for metrology. The share of the resources spent on research and development in the four areas of activity is between 60 % and 65 %, and for the public task to be fulfilled in a competent way also in future, this share will have to be upheld.

We hope that the forthcoming evaluation will lead to the discussion on the areas of work of the PTB, the strategic objectives and general conditions will be continued in a constructive way so that the PTB will be viable also in future, for the benefit of economy, science and society.

I hope you will enjoy reading our Annual Report on the year 2001. Those who wish to get a general idea of the PTB's activities in 2001 can read this printed report which gives excerpts, and those who look for specific details will find the complete Annual Report in the Internet on our homepage ([www.ptb.de](http://www.ptb.de)).

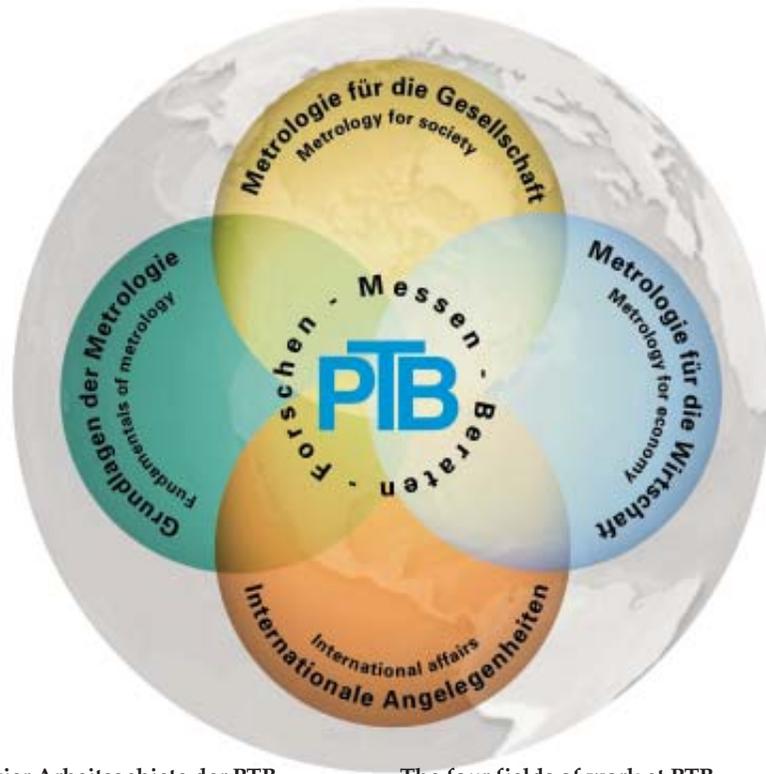
Ernst O. Göbel

## Inhaltsverzeichnis

Vorwort • Foreword	
Die PTB	5
Arbeitsgebiete und Ziele • Fields of work and objectives	6
Nachrichten des Jahres • News of the year	14
Zahlen und Fakten • Figures and facts	36
Die Abteilungen	46
Mechanik und Akustik	47
Elektrizität	55
Thermodynamik und Explosionsschutz	63
Optik	73
Fertigungsmesstechnik	83
Ionisierende Strahlung	93
Temperatur und Synchrotronstrahlung	103
Medizinphysik und metrologische Informationstechnik	113
Wissenschaftlich-technische Querschnittsaufgaben	125
Die Anlagen	138
Kuratorium	139
Organigramm	140
Organisatorisches	142
Jahresbericht im Internet	143
Geländepläne	144

PTB  
Die

# Arbeitsgebiete



## 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

6

## 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

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

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

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

Der Anteil an Forschung und Entwicklung über alle vier nebenstehend graphisch dargestellten Arbeitsgebiete der PTB 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 Technology, has been entrusted with this task in the Federal Republic of Germany.

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

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

7

## 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“.

Ein zentrales Thema stellen die Arbeiten zur Rückführung von SI-Einheiten auf Fundamentalkonstanten unter Ausnutzung quantenphysikalischer Prinzipien, insbesondere makroskopischer Quanteneffekte, dar. Gelingt dies, wie für Sekunde, Meter, Volt und Ohm bereits geschehen, kann man – zumindest nach unserem heutigen Verständnis der Physik – von einer von Ort und Zeit unabhängigen Realisierung der jeweiligen Einheit ausgehen. Aussichtsreiche Kandidaten, an deren Rückführung auf Fundamentalkonstanten weltweit intensiv geforscht wird, sind das Ampere, das Kelvin und das Kilogramm. Als weiteres Tätigkeitsfeld ergibt sich – auch in diesem Zusammenhang – die präzise Bestimmung von Fundamentalkonstanten. Aber auch bei der Darstellung von Einheiten auf der Basis klassischer Prinzipien 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 Chemie auf international anerkannte Normale oder Normalmesseinrichtungen, die für aus-gewählte organische und anorganische Analyte in der PTB und ihren Kooperationspartnern (BAM, UBA) entwickelt und 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 und medizinische Geräte mit Messfunktionen.

## 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”.

One central topic is the work for providing traceability of the SI units to fundamental constants using quantum-physical principles, especially macroscopic quantum effects. If this succeeds as has been the case for second, metre, volt and ohm, the realization of the units will be independent of location and time – at least according to our present understanding. Hopeful candidates whose traceability to fundamental constants is worldwide investigated in depth are the ampere, the kelvin and the kilogram. In consequence, another field of activity is the precise determination of fundamental constants. But also for the realization of units on the basis of classical principles, the requirements for uncertainties to be tolerated increase constantly so that the existing technologies must be improved or new technologies be developed. Of increasing importance is the traceability of measurements in analytical chemistry to internationally recognized standards or standard measuring devices developed and operated at the PTB and by its cooperation partners (BAM, UBA) for selected organic and anorganic analytes. Of particular importance to society is the development of standards and standard measuring devices for medical diagnostics and therapy control, for example for the dosimetry of ionizing radiation, ultrasound diagnostics and medical devices with measuring functions.

In the area “Fundamentals of metrology”, the share of research and development is very large, covering essential fields of the modern natural and engineering sciences. The results

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. Die Grundlagen der Metrologie werden in Deutschland in dieser Breite und Tiefe an keiner anderen Stelle bearbeitet.

## Metrologie für die Wirtschaft

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

Zum Ende des Berichtsjahres wurde die nationale Währung mit der Einheit DM zugunsten der europäischen Währung Euro umgestellt. Die Volks- und Betriebswirtschaftler sehen – oder hoffen –, dass dieser größer werdende Euro-Markt als größere Binnenwirtschaft durch die gemeinsame Währung auch größere Chancen für die deutsche Wirtschaft bringen wird. Insbesondere die KMU sollen von der europäischen Einheitswährung profitieren. Auf dem Gebiet der Messtechnik wurde der Schritt von den nationalen zu den internationalen Einheiten schon vor 125 Jahren gemacht. Und dies ebenfalls mit der Absicht, den Warenaustausch und die beginnende internationale wirtschaftliche Zusammenarbeit von dem „nicht-tarifären Handelshindernis“ der unterschiedlichen Maßeinheiten zu befreien. 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 daraufhin gearbeitet, 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 An-

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. Nowhere in Germany are the bases of metrology dealt with in more breadth and depth.

## Metrology for economy

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

At the end of the year under report, the national currency, the DM, was converted into the European currency, the euro. Economists and management experts see – or hope – that this expanding euro market as a greater single economy will derive greater chances from the common currency for the German economy. The small and medium-sized enterprises in particular will profit from the European single currency. In the field of metrology, the step from the national to the international units was already made 125 years before. And this also with the intention of relieving trade and the beginning international economic cooperation from the “technical barrier to trade” formed by the different units. Since its foundation in 1887, for the benefit of German industry, the PTB has not only realized the base units through metrological basic research but also provided the bases for exact and reliable measurements and tests in industry and trade by developing standards, standard measuring devices and reliable 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.

sprüchen 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 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. Projekte sind neu genehmigt worden, die ausnahmslos die industrielle Umsetzung der erwarteten Forschungsergebnisse durch beteiligte Industriebetriebe zum Inhalt haben.

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.

### 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

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 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.

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.

### 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

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 Normalmeseinrichtungen, 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.

Als neues High-tech-Gebiet mit stark zunehmender Industrialisierung und gesellschaftlicher Relevanz hat sich inzwischen die Biotechnologie etabliert. Die PTB hat mit der Bearbeitung einzelner Projekte gezielt einen ersten Einstieg in dieses Gebiet vollzogen und möchte diese Arbeiten zur Thematik „Mess- und Auswerteverfahren in der molekularen Medizin und Biotechnologie“ ausbauen.

In Absprache und Kooperation mit der *Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung* (BAM) ist die PTB auf den wirtschaftlich und vor allem gesellschaftlich wichtigen Gebieten

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.

As a new high-tech area which is characterized by strongly increasing industrialization and of great social relevance, biotechnology has meanwhile established itself. With some projects the PTB has joined this area and wishes to expand these activities which are focussed on measurement and evaluation methods for molecular medicine and biotechnology.

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

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.

### 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. Ein 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 darauf 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.

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.

### 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 its specialist area of 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

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 besonders für Europa.

Die PTB wird bei der Entwicklung und Gestaltung der europäischen und globalen Metrologie weiter eine führende Rolle einnehmen und ihre Erfahrungen aus den nationalen Netzwerken einbringen. Dabei werden die Pläne der Europäischen Kommission zur Gestaltung der europäischen Forschungslandschaft einbezogen und umgesetzt. Die PTB arbeitet maßgeblich in allen internationalen Metrologieorganisationen mit, zu einem erheblichen Teil in leitender Funktion. Die PTB betrachtet dies als unverzichtbaren Beitrag zur Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Wirtschaft und Wahrung der Interessen und Bedürfnisse der Gesellschaft. 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 2001 war sie in 176 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 2001 wurden 21 Länder in vier Kontinenten durch 35 Projekte beim Aufbau ihrer technischen Infrastruktur allein aus Mitteln des BMZ unterstützt.

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.

In the development and organization of European and global metrology, the PTB will also in future play a leading role and profit from the experience it has gained in the national networks. The plans of the European Commission for the organization of the European research landscape will be included and put into practice. The PTB makes substantial contributions to all international metrology organizations, for a considerable part in leading functions. It considers this to be an indispensable contribution to protecting the competitiveness of the German economy and to safeguarding the interests 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 2001, it was integrated in 176 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 2001, 21 countries on four continents were assisted by 35 projects in setting up their technical infrastructure from BMZ funds alone.

# Nachrichten des Jahres

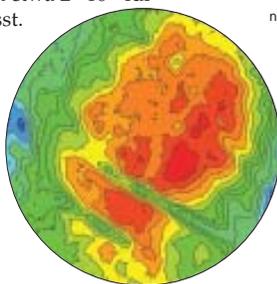
## Neues Interferometer hilft bei der Neubestimmung der Avogadro-Konstanten

Eine Kugel hat genau einen Durchmesser – das gilt in der Mathematik, nicht jedoch in der Präzisionsmesstechnik. In der PTB wird an nahezu perfekten Kugeln aus Silizium nach Abweichungen von der idealen Kugelgestalt gesucht. Dabei hilft ein neuartiges Interferometer, das nicht nur – wie bisher üblich – punktuell den Durchmesser misst, sondern auch ausgedehnte Topographien von Kugeloberflächen darstellen kann. Im Vakuum und bei präziser Temperierung misst das Gerät den Durchmesser mit einer Unsicherheit von etwa 1 nm.

Solch hochgenaue Messungen spielen eine Rolle bei den PTB-Aktivitäten zur Neubestimmung der Avogadro-Konstanten. Sie lässt sich aus dem Verhältnis der makroskopischen Dichte und der so genannten mikroskopischen Dichte der Elementarzelle eines Kristalls ableiten. Für die makroskopische Dichte muss unter anderem das Volumen einer Kugel aus einkristallinem Silizium mit etwa 90 mm Durchmesser über dimensionelle Messungen genau bestimmt werden. Außerdem muss durch separate Messverfahren wie die Ellipsometrie die Dicke der aufgewachsenen Oxidschicht ermittelt werden.

Erste Abschätzungen ergeben, dass sich mit dem neuen Kugel-Interferometer eine Gesamtmessunsicherheit von etwa  $2 \cdot 10^{-7}$  für das Volumen erreichen lässt.

Durchmessertopographie der Avogadro-Siliziumkugel in einem 60°-Segment. Erkennbar sind lokale Durchmesservariationen, die mit dem neuen Verfahren präzise erfasst werden können.



## Novel interferometer for re-determining Avogadro's constant

That a sphere has exactly one diameter is valid in mathematics but not in precision metrology. At the PTB, almost perfect spheres of silicon are examined for deviations from the ideal spherical form using a novel interferometer which not only – as usual in the past – selectively measures the diameter but also can represent extended topographies of spherical surfaces. In the vacuum and when precisely thermostatted, the device measures the diameter with an uncertainty of about 1 nm.

Such high-accuracy measurements bear a part in the PTB activities to re-determine Avogadro's constant. This can be deduced from the ratio of the macroscopic density to the so-called microscopic density of the unit cell of a crystal. To obtain the macroscopic density, dimensional measurements must be carried out to accurately determine, among other things, the volume of a sphere of monocrystalline silicon about 90 mm in diameter. Furthermore, the thickness of the epitaxially grown oxide layer must be determined by separate measuring methods such as ellipsometry.

First estimates have shown that the novel spherical interferometer allows an overall uncertainty of measurement of about  $2 \cdot 10^{-7}$  to be obtained for the volume.

Diameter topography of the Avogadro silicon sphere in a 60° segment. The discernible local diameter variations can be precisely determined by the novel procedure.

## Damit der Euro nicht durchfällt

Der Euro bringt ein Problem, das es bisher so nicht gab: Zum ersten Mal müssen Münzen derselben Währung in verschiedenen Staaten hergestellt werden. Kein Münzautomat darf einen echten Euro auswerfen, nur weil er aus einem anderen Land stammt – aber auch keine falschen Euros akzeptieren. Eine Voraussetzung dafür: die Standard-Legierungen, mit denen die Messgeräte in Münzautomaten kalibriert werden, müssen überall in Europa exakt gleich sein.

Weil sie das Material nicht zerstören und man sogar Problemen auf die Schliche kommt, die unter der Oberfläche liegen – tiefer liegenden Rissen zum Beispiel –, spielen Leitfähigkeitsmessungen in der Industrie eine große Rolle. Sind Flugzeug-Tragflächen oder Zug-Radreifen mit der Zeit brüchig geworden? Halten Niet- und Schweißverbindungen? Sind Rohre und Behälter mit radioaktivem Inhalt noch hundertprozentig dicht? Das sind nur einige der Fragen, die sich mit Leitfähigkeitsmessungen beantworten lassen. Auch bei der Herstellung von Münzlegierungen werden solche Messungen eingesetzt, und Münzautomaten verwenden sie zur so genannten Echtheitsprüfung.

Um Leitfähigkeits-Messgeräte zu kalibrieren, verwendet man in der PTB die Gleichstrommethode an stabförmigen Proben, im englischen Metrologie-Institut, dem *National Physical Laboratory* (NPL), dagegen die Wirbelstrommethode an ringförmigen Proben. In einem europäischen Projekt werden die beiden Methoden nun verglichen. Die Wissenschaftler suchen nach der Ursache für Abweichungen, um dann eine einheitliche Rückführungs-Methode zu entwickeln. Die Leitung des Projekts, das auf drei Jahre angelegt ist, liegt beim englischen NPL. Neben der PTB beteiligen sich das niederländische Metrologie-Institut NMI (*Nederlands Meetinstituut*) und einige Industriefirmen. Das Ziel: eine einheitliche Rückführung auf die SI-Einheiten zu sichern. Damit soll für die Hersteller von Leitfähigkeitsmessgeräten und für deren Anwender, zum Beispiel in der Airbus-Industrie, ein wesentliches Handelshemmnis abgebaut werden.

## Just to prevent the euro falling through

The euro entails a problem which has not been heard of in the past: For the first time coins of the same currency must be fabricated in different countries. Slot machines in one country must not reject a real euro only because it was minted in another country, nor must they accept counterfeited euros. One prerequisite for this: The standard alloys for which the measuring instruments in slot machines are calibrated must be exactly the same all over Europe.

Because they do not destroy the material and allow even hidden problems to be identified – internal cracks, for example –, conductivity measurements play an important role in industry. Have the wings of airplanes or the tires of trains become brittle in the course of time? Do riveted and welded joints last? Are pipes and containers with radioactive contents still 100 % tight? These are only some of the questions which can be answered with the aid of conductivity measurements. For the fabrication of coin alloys, too, such measurements are carried out, and slot machines use them to perform the so-called authenticity check.

For the calibration of conductivity measuring instruments, the PTB uses the d. c. method with bar-shaped samples, whereas the *National Physical Laboratory* (NPL), the British metrology institute, applies the eddy current method with annular samples. In a European project, these two methods will now be compared. The scientists search for the cause of deviations in order then to develop a uniform traceability method. The project which will have a term of three years is managed by the NPL. Besides the PTB, the *Netherlands Metrology Institute* NMI and some industrial companies will take part. The objective: to assure uniform traceability to the SI units and thus to remove an important barrier to trade for the manufacturers and users of conductivity measuring instruments such as, for example, the Airbus industry.

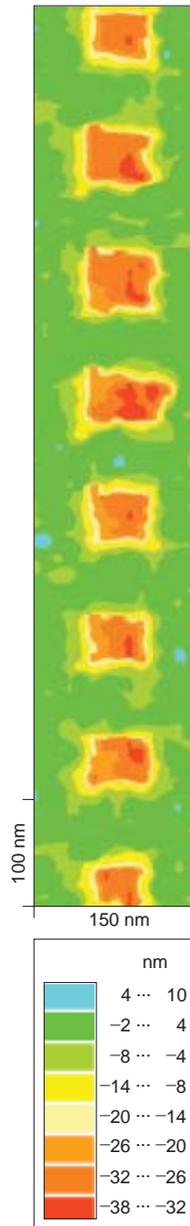
## Verbindung von Raster-sondenmikroskop und Röntgeninterferometer

Um Normale mit kleinsten lateralen Strukturen sehr genau zu kalibrieren, wurden in einer Machbarkeitsstudie, die die PTB zusammen mit dem *National Physical Laboratory (NPL)* Teddington, U. K., durchführte, ein höchstauflösendes Rastertunnelmikroskop und ein Röntgeninterferometer in einem Messaufbau kombiniert.

Das monolithische Röntgeninterferometer aus kristallinem Silizium, das in der PTB hergestellt worden war, diente als hochpräziser Verschiebetisch, um die Proben in diskreten Schritten von 0,192 nm, dem Abstand der Silizium-(220)-Ebenen, zu bewegen. Dieser Abstand ist seit einigen Jahren sehr genau auf die SI-Einheit Meter rückführbar. Die Bewegung ist ferner frei von Nichtlinearitäten, wie sie z. B. bei Laserinterferometern zu berücksichtigen sind, wenn man nur um Bruchteile der optischen Wellenlänge verschiebt.

Zur Verschiebung in einer zweiten Achse diente das Rastertunnelmikroskop, mit dem auch die Topographie der Probenoberfläche untersucht werden konnte.

Der Aufbau zeigte eine äußerst gute Reproduzierbarkeit und Stabilität. Bei einer Probe, einem 2D100-Gitter mit mehreren in die Oberfläche geätzten kleinen Gruben, deren nomineller lateraler Abstand 100 nm betrug, lieferte der Messaufbau für diesen Abstand einen Wert von  $(100,12 \pm 0,36)$  nm.



Pyramidenartige Vertiefungen in einer 2D100-Probe (Firma Nanosensors), die mit der neuen Messgeräte-Kombination aufgenommen wurden

Pyramidal depressions in a 2D100 sample (of Nanosensors make) recorded with the novel combination of measuring instruments

## Combination of scanning probe microscope and X-ray interferometer

For the calibration of standards with smallest lateral structures with as high an accuracy as possible, a feasibility study was conducted by the PTB together with the *National Physical Laboratory (NPL)* of the United Kingdom combining a scanning tunnel microscope of very high resolution with an X-ray interferometer in one measuring set-up.

The monolithic X-ray interferometer of crystalline silicon which had been fabricated at the PTB served as a high-precision translation stage to displace the samples in discrete steps of 0,192 nm, the spacing of the silicon (220) planes. For some years this spacing can be very accurately traced back to the SI unit of metre. Also, the motion is free from nonlinearities as are to be taken into account for laser interferometers when the displacement is of the order of only fractions of the optical wavelength.

For the displacement in a second axis, the scanning tunnel microscope was used which allowed also the topography of the sample surface to be investigated.

The set-up showed extremely good reproducibility and stability. For one sample – a 2D100 lattice with several small pits etched into the surface, whose nominal lateral spacing was 100 nm –, the measuring set-up furnished a value of  $(100,12 \pm 0,36)$  nm.

## Ein Schritt in Richtung Quantencomputer

Mit einem Bloch-Transistor, dem supraleitenden Pendant zum Einzelelektronen-Transistor (SET), kann ein Hindernis auf dem Weg zum Quantencomputer überwunden werden: Während normal leitende SET nur für einzelne Messungen an qubits eingesetzt werden können, sind nun kontinuierliche Messungen des Quantenzustands möglich.

Einzelelektronen-Transistoren (SET) haben gänzlich neue Experimentiermöglichkeiten geschaffen. Sie können auch Bruchteile einer auf ihrer Mittenelktrode (Insel) befindlichen Elementarladung detektieren und erlauben somit vielfältige Messungen von Elektronentransport- und Ladungsauschprozessen. In jüngster Zeit ist intensiv diskutiert worden, ob SET-Elektrometer auch den Quantenzustand von Ladungs-qubits in Cooper-Paar-Boxen messen können. Dabei sind die Empfindlichkeit des Elektrometers und seine Rückwirkung auf den Quanten-Zustand der Box von größter Bedeutung. Der auf die Bandbreite bezogenen Energieauflösung des Detektors ist durch die Heisenbergsche Unschärferelation eine natürliche Grenze gesetzt.

Wegen ihres erheblichen intrinsischen (Schrot)Rauschens können normal leitende SET's diese Grenze nicht erreichen. Demgegenüber kann ein Bloch-Transistor, der auf dem kohärenten („rauschfreien“) Tunneln einzelner Cooper-Paare beruht, für den Aufbau eines quantenbegrenzten Detektors für kontinuierliche zerstörungsfreie Ladungsmessungen verwendet werden. In der PTB wurde eine Elektrometerschaltung vorgeschlagen, bei der ein Bloch-Transistor in einen supraleitenden Ring eingefügt ist. Dieser Ring ist induktiv mit einem Hochfrequenzschwingkreis gekoppelt. Wenn neben dem Ring auch der Resonanzkreis supraleitend ist, wird die Empfindlichkeit der Ausleseanordnung letztlich durch die Empfindlichkeit des nachgeschalteten Verstärkers bestimmt. Ein solcher Kreis erlaubt die Durchführung kontinuierlicher Messungen des Quantenzustands. Darüber hinaus gestattet es die supraleitende Ringanordnung, die Insel des Bloch-Transistors selbst als Ladungs-qubit zu betreiben. Im Moment wird an der Umsetzung dieses Prinzips in die Praxis gearbeitet.

## A step toward the quantum computer

With a Bloch resistor, the superconducting counterpart of the single electron transistor (SET), obstacles to the development of the quantum computer can be overcome: While normally conducting SET's can be used only for single measurements on qubits, continuous measurements of the quantum state are now possible.

Single electron transistors (SET's) offer completely new possibilities to experimenters. They can detect fractions of an elementary charge on their centre electrode (island) and thus allow various measurements of electron transport and charge noise processes. Recently, it has intensively been discussed whether SET electrometers can also measure the quantum state of charge qubits in Cooper pair boxes. Here the sensitivity of the electrometer and its retroaction on the quantum state of the box are of utmost importance. To the energy resolution of the detector, which is related to the bandwidth, a natural limit is set by Heisenberg's uncertainty relation.

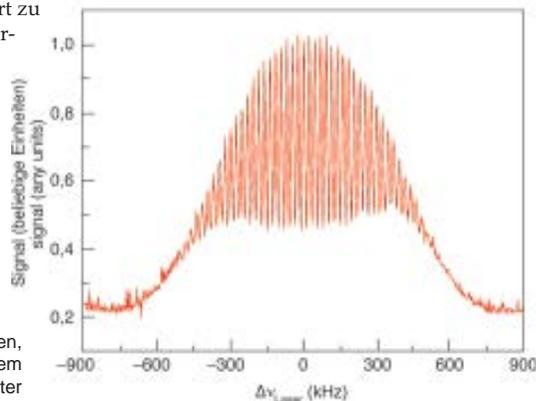
Due to its considerable intrinsic (shot) noise, normally conducting SET's cannot reach this limit. In contrast to this, a Bloch transistor which is based on the coherent (“noiseless”) tunneling of single Cooper pairs, can be used for setting up a quantum-limited detector for continuous nondestructive charge measurements. At the PTB, an electrometer circuit was suggested in which a Bloch transistor is inserted into a superconducting ring inductively coupled with a series-resonance tank circuit. If not only the ring but also the series-resonance tank circuit are superconducting, the sensitivity of the readout arrangement will be ultimately determined by the sensitivity of the downstream amplifier. Such a circuit allows continuous measurements of the quantum state. Furthermore, the superconducting ring arrangement permits the island of the Bloch transistor itself to be operated as charge qubit. At present, the practical application of this principle is pursued.

## Erzeugung von ultrakalten Calcium-Atomen

Im PTB-Fachbereich *Länge und Zeit* wird als eine mögliche Realisierung einer optischen Uhr das Calcium-Frequenznormal untersucht. Dabei wird ein Laser auf eine schmale atomare Übergangslinie des  $^{40}\text{Ca}$  stabilisiert. Zur Reduzierung der Unsicherheit werden die Atome vor der Abfrage des Uhrenübergangs in einer magneto-optischen Falle gespeichert und gekühlt. Bisher war die erzielbare minimale Temperatur der Calciumatome durch das Dopplerlimit des breiten Kühlübergangs im Singulettssystem auf einige Millikelvin begrenzt.

Verwendet man dagegen die schmale Interkombinationslinie  $^1\text{S}_0\text{-}^3\text{P}_1$ , die bisher nur als „Uhrenübergang“ für das Frequenznormal genutzt wurde, dann liegt die „theoretische“ Grenze unter 100 nK. Allerdings ist die Kühlkraft wegen der langen Lebensdauer des angeregten Zustands und der damit verbundenen kleinen Streurate so klein, dass die Atome nicht gegen die Gravitationskraft gespeichert werden können. Durch Verwendung eines zusätzlichen Lasers, der angeregte Atome in einen weiteren Zustand anregt, von dem aus sie wieder schnell in den Grundzustand zerfallen, wird die effektive Lebensdauer des  $^3\text{P}_1$ -Zustandes verkürzt („gequencht“) und die Kühlkraft erhöht. Mit dieser „Quenchkühlung“ ist es gelungen, Wolken von Calcium-Atomen mit einer Temperatur unter 10  $\mu\text{K}$  zu präparieren. Als erster Schritt auf dem Weg zu einem Ca-Frequenznormal mit ultrakalten Atomen wurden hochaufgelöste Atominterferenzen erzeugt. Die schmalere Geschwindigkeitsverteilung führt zu einem höheren Interferenzkontrast und einer geringeren Unsicherheit des Ca-Frequenznormals.

Atominterferenzen, beobachtet an einem Ensemble ultrakalter Ca-Atome



Atomic interferences observed on an ensemble of ultracold Ca atoms

## Production of ultracold atoms

At the PTB *Length and Time Department*, the calcium frequency standard is being investigated as one potential realization of an optical clock, a laser being stabilized to a narrow atomic transition line of the  $^{40}\text{Ca}$ . To reduce the uncertainty, the atoms are stored and cooled in a magneto-optical trap prior to the interrogation of the clock transition. In the past, the minimum temperature achievable for the calcium atoms has been bounded by the Doppler limit of the broad cooling transition in the singlet system to some millikelvin.

If, however, the narrow intercombination line  $^1\text{S}_0\text{-}^3\text{P}_1$  is used, which up to now has been used only as “clock transition” for the frequency standard, the “theoretical” limit is below 100 nK. But due to the long life of the excited state and the associated small scattering rate, the cooling power is so small that the atoms cannot be stored against the gravitational force. When an additional laser is used exciting the excited atoms into another state from which they rapidly decay again into the ground state, the effective life of the  $^3\text{P}_1$  state is reduced (“quenched”) and the cooling power increased. With this “quench cooling” it has been possible to prepare clouds of calcium atoms with a temperature below 10  $\mu\text{K}$ . As a first step towards a Ca frequency standard with ultracold atoms, highly resolved atomic interferences were produced. The narrower velocity distribution leads to a higher interference contrast and a smaller uncertainty of the Ca frequency standard.

## Mikro-Ionenstrahl für hochenergetische Protonen und $^4\text{He}$ -Ionen

An den Ionenbeschleunigern der PTB wurde eine neue Apparatur in Betrieb genommen, die Experimente mit einer abzählbaren Anzahl von Ionen und einer hohen Ortsauflösung erlaubt. Da im Extremfall ein einziges Ion appliziert werden kann, ist es möglich, die ultimativ geringste Dosis für die betreffenden Ionen einzustellen.

Mit einer Lochblende (Durchmesser 5  $\mu\text{m}$  bis 20  $\mu\text{m}$ ) und magnetischen Linsen wird die laterale Strahlbreite des Ionenstrahls am Experimentierplatz auf 1  $\mu\text{m}$  bis 3  $\mu\text{m}$  (einfache Standardabweichung) reduziert. Gleichzeitig kann die Intensität des Strahls kontrolliert auf wenige Teilchen je Sekunde eingestellt werden. Das schnelle Ein- und Ausschalten des Strahls ( $\tau < 10 \mu\text{s}$ ) wird mittels einer elektrostatischen Ablenk-Einheit realisiert. Durch dieses Verfahren wird die hohe Energieschärfe des Ionenstrahls ( $\Delta E/E \approx 10^{-3}$ ) nicht beeinträchtigt. Die Nachweiswahrscheinlichkeit für Ionen liegt je nach Energie und verwendetem Detektor zwischen 95 % und 100 %.

Eine Anwendung für den Mikro-Ionenstrahl ist die Untersuchung von Strahlenschäden bei geringen Dosen an lebenden Zellen. Diese Experimente werden in interdisziplinärer Zusammenarbeit mit Partnern aus der Radiobiologie (*Universität Göttingen* u. a.) durchgeführt. Erste Bestrahlungen konnten bereits vorgenommen werden. Weitere Anwendungen liegen in der Materialforschung und in der metrologischen Grundlagenforschung. In diesen Gebieten wurden bereits Kooperationen mit anderen Universitäten und Forschungseinrichtungen initiiert.

## Micro ion beam for high-energy protons and $^4\text{He}$ ions

On the ion accelerators of the PTB a novel apparatus was put into operation, which allows experiments with a countable number of ions and high spatial resolution. As in the extreme case a single ion can be applied, it is possible to adjust the ultimate lowest dose for the individual ions.

With an iris stop (5  $\mu\text{m}$  to 20  $\mu\text{m}$  in diameter) and magnetic lenses the lateral beamwidth of the ion beam on the experimentation set-up is reduced to 1  $\mu\text{m}$  to 3  $\mu\text{m}$  (simple standard deviation). At the same time, the intensity of the beam can be adjusted in a controlled way to several particles per second. Rapid switching on and off of the beam ( $\tau < 10 \mu\text{s}$ ) is achieved by means of an electrostatic deflection unit without the narrow energy spread of the ion beam being compromised ( $\Delta E/E \approx 10^{-3}$ ). The detection probability for ions is between 95 % and 100 % depending on energy and detector used.

An application for the micro ion beam is the investigation of radiation damages to living cells at small doses. These experiments are conducted in interdisciplinary cooperation with partners from radiobiology (*Göttingen University* and others). First exposures could already be carried out. Further applications are in the fields of materials research and metrological basic research. Here cooperation with other universities and research centres has already been initiated.



Mikro-Ionenstrahl-Apparatur mit optischem Mikroskop

Micro ion beam apparatus with optical microscope

### Hydrodynamisches Prüffeld als neues nationales Primärnormal

Das Hydrodynamische Prüffeld der PTB, das kurz vor seiner Vollendung steht, wird künftig als nationales Primärnormal für die Messgrößen Volumen- und Massedurchfluss sowie Volumen und Masse von strömendem Wasser dienen.

Es besteht aus einem Tief- bzw. Vorratsbehälter, drehzahl-geregelten Pumpen, einem Hochbehälter mit Überlaufwehr und den beiden Messstrecken. Diese speziell gestalteten Rohrstrecken mit Längenausgleichseinrichtung ermöglichen hochgenaue Kalibrierungen bei Durchflusswerten von 0,3 m<sup>3</sup>/h bis ca. 2100 m<sup>3</sup>/h.

Die geringe Messunsicherheit der Anlage von 0,02 % wird u. a. durch den Einsatz zweier physikalisch unterschiedlicher Referenznormale erzielt: ein gravimetrisches Referenznormal, bestehend aus drei Wägesystemen (300 kg, 3 t und 30 t), und ein volumetrisches Referenznormal in Form einer Rohrprüfstrecke (Messvolumen 250 Liter).

Die zu kalibrierende Messgröße Durchfluss lässt sich sehr genau einstellen und zeitlich konstant halten. Dafür sorgen automatische Regeleinrichtungen des Prozessleitsystems – ebenso wie für vergleichbar hohe Regelgenauigkeiten bei der Einstellung und Stabilisierung der Prozess-Zustandsgrößen Temperatur und Druck.



Messstrecken und Wägesysteme des Hydrodynamischen Prüffelds

Measuring sections and weighing systems of the Hydrodynamic Test Field

### Hydrodynamic Test Field as a novel national primary standard

The Hydrodynamic Test Field of the PTB which will soon be completed will serve as the national primary standard for the measurands of volume flow and mass flow as well as of volume and mass of flowing water.

It consists of an underground or storage tank, variable-speed pumps, an overhead tank with weir and the two measuring sections. These specifically designed pipe sections with length compensation device allow high-accuracy calibrations to be carried out at flowrate values of 0,3 m<sup>3</sup>/h to about 2100 m<sup>3</sup>/h.

The small uncertainty of measurement of the system of 0,02 % is due, among other things, to the use of two physically different reference standards: a gravimetric reference standard consisting of three weighing systems (300 kg, 3 t and 30 t) and a volumetric reference standard in the form of a prover loop (measurement volume 250 litre).

The measurand of flowrate to be calibrated can be very exactly set and kept constant with time. This is achieved by automatic control devices for the process control system – just as for comparably high control accuracies for the setting and stabilization of the process variables of state of temperature and pressure.

### Qualitätsmanagement-System der PTB erfolgreich

Im Oktober 1999 haben die Präsidenten von 36 nationalen Metrologie-Instituten und von zwei internationalen Organisationen ein multilaterales Abkommen (CIPM-MRA) zur gegenseitigen Anerkennung der nationalen Normale und der entsprechenden Ergebnisberichte unterzeichnet. Grundlage bilden

- internationale und regionale Vergleichsmessungen sowie die
- Einrichtung eines QM-Systems (QMS) auf der Grundlage der ISO/IEC 17 025.

Für die Darstellung und Bewahrung nationaler Normale ist in Deutschland die PTB zuständig; Teilaufgaben sind an die *Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung* und das *Umweltbundesamt* übertragen worden.

Im Rahmen des CIPM-MRA haben sich die Unterzeichner verpflichtet, bis Ende 2002 in ihren Instituten ein QMS einzurichten und zu betreiben. Zur Umsetzung dieser Übereinkunft hat EUROMET ein QS-Forum ins Leben gerufen, bei dem die EUROMET-Mitglieder nacheinander ihr QMS bzw. die Arbeiten dazu präsentieren, um so

- Vertrauen in die Erfüllung der Anforderungen des CIPM-MRA zu schaffen und
- den Erfahrungsaustausch zwischen den Mitgliedern zu fördern.

In diesem Zusammenhang haben im Oktober 2001 in Wien Vertreter der PTB ihr QMS erfolgreich präsentiert. Zur Vorbereitung auf die Präsentationen wurden den Teilnehmern des QS-Forums detaillierte Berichte über die Entwicklung, den organisatorischen Aufbau und die praktische Realisierung des QMS übergeben. Die eingereichten Dokumente dienen zur Vertrauensbildung, dass die angegebenen Mess- und Kalibriermöglichkeiten in vollem Umfang durch das QMS erfasst sind und den Anforderungen von EUROMET entsprechen. Bei der Berichterstattung lagen die Schwerpunkte im Erfahrungsaustausch zur Umsetzung der Anforderungen der ISO/IEC 17 025 in der metrologischen Praxis.

Die Präsentationen in Wien stellen einen wichtigen Schritt im vertrauensbildenden Prozess zur Anerkennung der im CIPM-MRA vereinbarten deutschen Mess- und Kalibriermöglichkeiten dar.

### Quality system of the PTB successful

In October 1999, the presidents of 36 national metrology institutes and two international organizations signed a multilateral agreement (CIPM-MRA) on the mutual recognition of national standards and associated result reports. This agreement is based on

- international and regional comparison measurements as well as the
- setting-up of a quality system on the basis of ISO/IEC 17 025.

In Germany, the PTB is responsible for the realization and maintenance of the national standards; partial tasks have been assigned to the *Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung* and to the *Federal Office for Environmental Protection*.

The signatories have undertaken to set up and operate a quality system at their institutes by the end of 2002. For the implementation of this arrangement, EUROMET has founded a quality assurance forum within which the EUROMET members one after another present their quality systems and associated activities with a view to

- building confidence in the fulfilment of the CIPM-MRA requirements, and
- furthering the exchange of experience among the members.

In this connection, representatives of the PTB successfully presented their quality system in Vienna in October 2001 and handed over to the participants detailed reports on the development, organization and practical realization of the quality system. The documents submitted served to prove that the measuring and calibration capabilities stated are fully covered by the quality system and meet the EUROMET requirements. The reports were focused on the exchange of experience with a view to putting the requirements of ISO/IEC 17 025 into metrological practice.

The presentations in Vienna are an important step in the confidence-building process for the recognition of the German measuring and calibration capabilities agreed on in the CIPM-MRA.

**Softwareprüfstelle der PTB akkreditiert**

Software ist in der PTB nicht nur ein Hilfsmittel für Prüfungen, sondern selbst Prüfobjekt. Um das Vertrauen in die korrekte und zuverlässige Arbeitsweise von Systemen, die wesentlich auf Software basieren, zu gewährleisten, wurde eine für Kunden offene Softwareprüfstelle eingerichtet und von der DATECH (*Deutsche Akkreditierungsstelle Technik e. V.*) akkreditiert.

Wer Software einsetzt, geht gewisse Gefahren und Risiken ein, die nicht vernachlässigt werden dürfen. So ist es z. B. eine Herausforderung, die Software korrekt, d. h. den funktionalen Anforderungen gemäß, zu implementieren. Soll die Software weiterhin leicht änderbar sein, so reichen die damit verbundenen Risiken bis zur Manipulationsgefahr. Das immer verbleibende (Rest-)Risiko gilt es zu minimieren.

Zum Leistungsspektrum der PTB-Softwareprüfstelle gehört neben der Einzelprüfung von Software für Messgeräte, Prüfplätze, Kalibriereinrichtungen usw. auch die vorbeugende Beurteilung von Softwareentwicklungsprozessen im Rahmen von Audits bei Softwareherstellern. Von diesem Angebot können nicht nur Prüf- und Kalibrierlaboratorien innerhalb und außerhalb der PTB profitieren, sondern auch die Hersteller von Mess- und Prüfeinrichtungen, insbesondere von kleinen und mittelständischen Unternehmen.



Im Jahre 2001 wurde Software aus folgenden Bereichen geprüft: Wahlgeräte, Referenzmessplätze, Messunsicherheitsberechnung und Messgerätesteuerung.

**Software Test Centre of the PTB accredited**

At the PTB, software is not only a tool for tests but also itself a test object. To warrant the confidence in the correct and reliable operation of systems essentially based on software, a software test centre accessible to the customers was established and accredited by the DATECH (*Deutsche Akkreditierungsstelle Technik e. V.*).

Those who use software take certain risks which should not be underrated. It is, for example, a challenge to implement the software correctly, i. e. according to the functional requirements. If the software must be easy to alter, the risks might even involve the danger of manipulation. The residual risk which must always be faced is to be minimized.

Besides the individual tests of software for measuring instruments, test set-ups, calibration devices, etc., the PTB Software Test Centre also offers preventive assessment of software developments within the scope of audits it carries out at the software house. This offer can be used not only by test and calibration laboratories inside and outside the PTB but also by the manufacturers of measuring and test equipment, especially small and medium-sized enterprises.

In 2001, software from the following areas was tested: voting machines, reference measuring set-ups, calculation of measuring uncertainty and measuring instrument control.

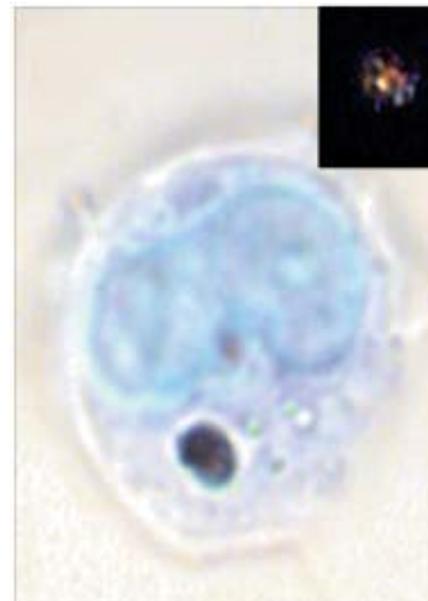
ESD1 von der Firma Nedap, das erste softwaregesteuerte Wahlgerät

ESD1 of Nedap make, the first software-controlled voting machine

**Neue Methode zur Malaria-Diagnostik**

In PTB wurde in Zusammenarbeit mit der Charité, Klinik für Infektiologie, ein auf der Laser-Durchflusszytometrie basierendes Verfahren zur Unterstützung der Malaria-Diagnostik entwickelt. Durch die Detektion seltener, durch die Infektion veränderter weißer Blutzellen (Monozyten) konnte erstmals eine Malaria-Erkrankung auch bei nicht-immunen Patienten mit hoher Spezifität und Sensitivität durchflusszytometrisch nachgewiesen werden. Die Methode eignet sich zur Identifikation von Patienten, bei denen kein klinischer Verdacht einer Malaria-Erkrankung besteht, und erlaubt die Einleitung der erforderlichen mikroskopischen Diagnostik.

Die Malaria ist eine der gefährlichsten Infektionskrankheiten weltweit mit ca. 2,5 Millionen Todesfällen pro Jahr. Auch in Industrienationen kommt es zu Todesfällen, die durch eine möglichst frühe Erkennung der Infektion verhindert werden könnten. Als Standardverfahren der Malaria-Diagnostik gilt die Mikroskopie, die die Unterscheidung der vier verschiedenen Parasitenarten sowie die Bestimmung der Konzentration der von Parasiten befallenen roten Blutzellen erlaubt. Derartige Untersuchungen werden jedoch nur bei einem klinischen Verdacht durchgeführt, so dass es zum Beispiel bei Personen nach einer Reise in endemische Gebiete zu einer Verzögerung der Diagnosestellung kommen kann.



Das in der PTB erprobte durchflusszytometrische Verfahren erlaubt einen Malaria-Nachweis mit einer Spezifität von 100 %; eine Sensitivität von 86 % (100 %) wurde für nicht-immune (semi-immune) Patienten erreicht.

**Novel method for malaria diagnostics**

In cooperation with the Charité, the Berlin Clinic for Infectiology, a procedure based on laser flow cytometry was developed at the PTB to support malaria diagnostics. The detection of rare white blood cells changed by the infection (monocytes) for the first time allowed malaria to be diagnosed also in non-immune patients with high specificity and sensitivity by flow cytometry. The method is suitable for the identification of patients for whom malaria is clinically suspected and allows the necessary microscopic diagnostics to be initiated.

With about 2,5 million deaths yearly, malaria is one of the most dangerous infectious diseases worldwide. In industrialized countries, too, there are deaths which might be prevented if the infection was detected at an early date. A standard method of malaria diagnostics is microscopy which allows the four different types of parasites to be distinguished and the concentration of the parasite-laden red blood cells to be determined. Such examinations are, however, carried out only if malaria is clinically suspected so that a diagnosis for people returning from a journey to endemic regions is possibly delayed.

The flow-cytometric method tested at the PTB allows malaria detection with a specificity of 100 %; a sensitivity of 86 % (100 %) being reached for non-immune (semi-immune) patients.

Mikroskopische Aufnahme eines Monozyten mit Hämозоин-Einschluss

Microscopic picture of a monocyte with hemozoin inclusion

### Ausbau der Photonenmetrologie am PTB-Standort Berlin-Adlershof – Minister Müller im PTB-Labor bei BESSY

Um die künftigen Anforderungen an die Photonenmetrologie und den europäischen Bedarf an Synchrotronstrahlung bei niedrigen Photonenenergien erfüllen zu können, wurden die Vorbereitungen zur Errichtung eines Niederenergie-Kompaktspeicherrings für die UV- und EUV-Metrologie und -Technologie so weit vorangebracht, dass der Bauantrag beim *Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie* gestellt werden konnte. Der Speicherring mit durchstimmbarer Elektronenenergie von 200 MeV bis 600 MeV soll in den Jahren 2004 bis 2007 entstehen und in die BESSY-II-Anlage am Wirtschafts- und Wissenschaftsstandort Berlin-Adlershof integriert werden.

Am 3. Juli 2001 besuchte Bundeswirtschaftsminister Werner Müller das Synchrotronstrahlungslabor der PTB bei BESSY, um sich über den Kompaktspeicherring und über die Entwicklungsarbeiten der PTB zur Extrem-UV-Lithographie (EUV-Lithographie) zu informieren.

Rundgang durch das Synchrotronstrahlungslabor der PTB bei BESSY.

Prof. Wende, Leiter des Instituts Berlin der PTB, erläutert Minister Müller an einem Silizium-Wafer die Entwicklungsarbeiten zur EUV-Lithographie, die die PTB in enger Kooperation mit der deutschen Industrie und deren europäischen Partnern bearbeitet (links Dr. Röhling, Leiter der Abteilung Technologie- und Innovationspolitik im BMWi, rechts Dr. Ulm, Leiter des Fachbereichs Photonenradiometrie im Institut Berlin der PTB). Das

Gerät im Hintergrund ist die Vorstufe einer EUV-lithographischen Belichtungsmaschine für EUV-Strahlung der Wellenlänge 13 nm (angestrebte Auflösung 30 nm).



### Extension of photon metrology at the PTB site in Berlin-Adlershof – Minister Müller visits the PTB laboratory at BESSY

In order to fulfil future requirements for photon metrology and to cover the European demand for synchrotron radiation at low electron energies, the PTB continued with the preparations for the establishment of a compact low-energy electron storage ring so that the application for this building could be submitted to the *Federal Ministry of Economics and Technology*. The storage ring with tunable electron energy from 200 MeV to 600 MeV is to be integrated into the BESSY II facilities at the technology and science location of Berlin-Adlershof between 2004 to 2007.

The Federal Minister of Economics and Technology, Werner Müller, visited the Synchrotron Radiation Laboratory of the PTB at BESSY on July 3, 2001, to inform himself about the compact storage ring and the PTB's contributions to the development of extreme-UV (EUV) lithography.

Tour of the Synchrotron Radiation Laboratory of the PTB at BESSY.

With the aid of a silicon wafer, Prof. Wende, head of the PTB's Berlin Institute, explains to the Federal Minister of Economics and Technology, Dr. Werner Müller (on the left Dr. Röhling, head of the Ministry's Technology and Innovation Division; on the right Dr. Ulm, head of the Photon Metrology Department of PTB Berlin) the contributions to the development of extreme-UV (EUV) lithography PTB makes in close cooperation with German

industry and its European partners. The device in the background is a first test version of a lithographic exposure tool intended to reach semiconductor linewidths of 30 nm with EUV radiation of 13 nm wavelength.

### Abkommen mit China

Deutsche Waagenexporteure werden von jetzt an deutliche Erleichterungen bei ihrem Handel mit China spüren. Professor Manfred Kochsiek, Vizepräsident der PTB, unterzeichnete am 1. November in Peking ein Abkommen zwischen der PTB und mehreren chinesischen Partnerinstituten zur gegenseitigen Anerkennung von Messergebnissen, zunächst für Waagen und Wägezellen. Neben Japan, mit dem ein entsprechendes Abkommen seit 1999 besteht, wird damit auch China von der PTB durchgeführte messtechnische Prüfungen anerkennen und umgekehrt. Die Unterzeichnung fand im Rahmen der zweiten Ministertagung des Deutsch-Chinesischen Hochtechnologie-Dialogforums statt, zu der Bundeskanzler Gerhard Schröder und Wirtschaftsminister Werner Müller mit einer hochrangigen Wirtschaftsdelegation anreisten.

In Europa ist die Anerkennung der deutschen Prüfergebnisse bei Waagen und Wägezellen seit 1993 gängige Praxis. So gibt es nur noch europäische und keine nationalen Zulassungen mehr, was insbesondere der deutschen Waagenindustrie mit einem europäischen Marktanteil von über 40 % und einem Weltmarktanteil von 25 % große Vorteile im Exportgeschäft verschafft. Während Europa damit einen wichtigen Schritt zur Harmonisierung gegangen ist, bestehen in anderen bedeutsamen Absatzmärkten noch immer Handelsbarrieren aufgrund unterschiedlicher Prüfvorschriften. Das Abkommen mit China könnte ein Signal für zukünftige, multilaterale Vereinbarungen mit weiteren Ländern der Welt setzen.

Prof. Manfred Kochsiek, Vizepräsident der PTB und Xuan Xiang, Hauptabteilungsleiter der Metrologie im AQSIQ (State General Administration for Quality, Supervision Inspection and Quarantine) bei der Unterzeichnung des „Mutual Recognition Agreement of Test Results“ in der Halle des Volkes in Peking



Professor Manfred Kochsiek, Vice-president of the PTB, and Xuan Xiang, head of the Department of Metrology at the AQSIQ (State General Administration for Quality, Supervision Inspection and Quarantine) signing the Mutual Recognition Agreement of Test Results at the Hall of the People in Beijing

### Arrangement with China

German exporters of weighing instruments will from now on profit from considerable facilities for their trade with China. In Beijing on November 1, Professor Manfred Kochsiek, Vice-president of the PTB, signed an arrangement between the PTB and several Chinese partner institutes on the mutual recognition of measurement results of weighing instruments and load cells. Besides Japan with whom such an arrangement has been existing since 1999, China too will now recognize metrological tests carried out by the PTB and vice versa. The signing took place within the scope of the second ministerial meeting of the Sino-German high-tech dialogue forum in which the Federal Chancellor Gerhard Schröder and the Minister of Economics Werner Müller participated together with a high-ranking trade delegation.

In Europe, the recognition of the German test results obtained with weighing instruments and load cells has been common practice since 1993. Thus we no longer have national but only European approvals, which entails great export advantages for the German weighing instrument industry with its European market share of more than 40 % and a world market share of 25 %. While Europe thus has made an important step towards harmonization, other important markets still have to cope with barriers to trade due to differences in the testing regulations. The arrangement with China might be a signal for future multilateral agreements also with other countries.

## DKD-Akkreditierungsstelle neu strukturiert

In Zusammenarbeit mit dem BMWi wurde eine neue Struktur der Akkreditierungsstelle des DKD geschaffen, die durch einen Erlass des BMWi am 1. Juli 2001 in Kraft getreten ist. Die Umstrukturierung folgt den internationalen Forderungen nach einer nicht nur tatsächlichen, sondern auch deutlich sichtbaren „Unparteilichkeit von Akkreditierungsstellen“, wie sie in Dokumenten der ILAC zur gegenseitigen Anerkennung von Akkreditierungen wie auch im Normentwurf ISO/IEC CD 17 011 zum Ausdruck kommt.

Die bisherige Geschäftsstelle des DKD, die als Referat Q.32 „Akkreditierung“ in die Organisationsstruktur der PTB eingegliedert war, ist eine eigenständige und fachlich unabhängige Organisationseinheit mit der Bezeichnung „Akkreditierungsstelle des Deutschen Kalibrierdienstes bei der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt“ geworden. Fachaufsichtlich untersteht sie dem BMWi, dienstaufsichtlich dem Präsidenten der PTB. Räumlich bleibt sie in der PTB und wird von ihr mit Personal und Sachmitteln ausgestattet. Die Mitarbeiter der Akkreditierungsstelle sind dieselben wie die der bisherigen Geschäftsstelle des DKD; an ihrem Status als PTB-Angehörige ändert sich nichts. Dem Leiter der Akkreditierungsstelle obliegt die Verantwortung für die Akkreditierung und Überwachung der DKD-Laboratorien sowie für die Vertretung des DKD. Insbesondere hinsichtlich der Akkreditierungsentcheidung unterliegt er keinen Weisungen der aufsichtführenden Stellen. Er wird nach Zustimmung des BMWi vom Präsidenten der PTB bestellt. Dem bisherigen Leiter des Referats „Akkreditierung“, Eberhard Fay, wurde diese Aufgabe anvertraut.

## DKD Accreditation Body restructured

In cooperation with the *Federal Ministry of Economics and Technology* (BMWi), the Accreditation Body of the PTB was given a new structure which came into effect by a BMWi decree on July 1, 2001. This restructuring is the answer to the international demand for impartiality of accreditation bodies which should be not only real but also clearly noticeable as specified in ILAC documents regarding the mutual recognition of accreditations and in the draft standard ISO/IEC CD 17 011.

The previous Executive Office of the DKD which was the PTB's Accreditation Section now is a separate and technically independent organization unit of the PTB named "Accreditation Body of the Deutscher Kalibrierdienst at the Physikalisch-Technische Bundesanstalt." In technical matters it is supervised by the BMWi and in administrative terms, by the President of the PTB. Its offices have remained at the PTB site, and the PTB also makes the required staff and equipment available. The members of the Accreditation Body have not changed, and they also remain PTB employees. The head of the Accreditation Body is responsible for the accreditation and supervision of the DKD laboratories and also for the representation of the DKD. Especially as regards the accreditation decisions, he is not subject to directives from the supervising bodies. He is appointed by the President of the PTB upon approval by the BMWi. This task was entrusted to Eberhard Fay, the former head of the Accreditation Section.

This organizational change required not only the consent of the BMWi but also the readiness of the PTB to support the accreditation

Die Mitglieder der DKD-Akkreditierungsstelle. Ihr Leiter Eberhard Fay (4. von rechts) wurde nach seinem Eintritt in den Ruhestand am 30.11.2001 von Wolfgang Bosch (3. von rechts) abgelöst.

The members of the DKD Accreditation Body. When he went into retirement on November 30, 2001 Eberhard Fay, the head of the Accreditation Body (4th from the right) was succeeded by Wolfgang Bosch (3rd from the right).

Diese Organisationsänderung bedurfte nicht nur der Zustimmung des BMWi, sondern auch der Bereitschaft der PTB auf breiter Basis, die Akkreditierungsstelle zu unterstützen. Ziel der Umstrukturierung ist es, die sich abzeichnenden Forderungen bezüglich der Unparteilichkeit und Unabhängigkeit zu erfüllen, zugleich aber auch die fachliche Nähe zur PTB beizubehalten. Zum einen beruht der gute Ruf des DKD entscheidend auf der metrologischen Kompetenz der PTB, zum anderen ist auch für die PTB der DKD ein wichtiges Instrument bei der Erfüllung ihrer Aufgabe zur Schaffung einer messtechnischen Infrastruktur in Deutschland. Nur durch diesen Gleichklang der Interessen war es möglich, die neue Struktur einzuführen.

Um die Akkreditierungsstelle zu unterstützen und die Zusammenarbeit zwischen der Akkreditierungsstelle und den Fachbereichen der PTB zu fördern, wurde ein DKD-Expertengremium in der PTB eingerichtet. Ihm obliegt die Behandlung der PTB-Aufgaben, die im Zusammenhang mit dem DKD stehen, aber keine Aufgaben der Akkreditierung im engeren Sinne sind. Zum Leiter dieses Gremiums wurde der Leiter der Abteilung *Mechanik und Akustik* der PTB, Prof. Manfred Peters, bestellt. Ferner gehören ihm die Mitglieder des bisherigen Leitungsgremiums sowie bisherige Sektorkoordinatoren an, also Persönlichkeiten, die den DKD lange kennen und seine Ziele fördern.

Der DKD hat damit konsequent einen Weg beschritten, der trotz aller Vorteile der bisherigen Struktur als unausweichlich angesehen wurde. Erfreulich positiv ist die Resonanz aus maßgeblichen nationalen und internationalen Kreisen. Für die DKD-Kunden, die Kalibrierlaboratorien, und für die DKD-Partner im DAR, in EA und in ILAC hat die Änderung kaum Auswirkungen. Viel wird von der guten Zusammenarbeit der Beteiligten abhängen. Das Ziel ist es, dass die DKD-Kalibrierlaboratorien neben dem Service der Akkreditierungsstelle nach wie vor vom messtechnischen Wissen der PTB profitieren.

Das DKD-Expertengremium der PTB

The DKD expert group of the PTB

body on a broad basis. The aim of the restructuring is to fulfil the demands as regards impartiality and independence and to maintain closeness to the PTB. On the one hand, the DKD owes its reputation to the metrological competence of the PTB, and on the other hand, the DKD is an important tool for the PTB in the creation of a metrological infrastructure in Germany. Only owing to this reciprocity of interests has it been possible to adopt the new structure.

To support the Accreditation Body and the cooperation between the Accreditation Body and the divisions of the PTB, a DKD expert body was established at the PTB to deal with PTB tasks which are related to the DKD but strictly speaking are not accreditation tasks. Prof. Manfred Peters, the head of the *Mechanics and Acoustics Division* was appointed as the head of the body which also comprises members of the previous managing board as well as the former sector coordinators, i. e. persons who have known and supported the DKD's objectives for a long time.

The DKD thus has consistently chosen a way which was considered to be imperative despite the advantages of the former structure. We are glad to say that the reaction of the leading national and international circles is positive. For the DKD customers, the calibration laboratories, and for the DKD partners in the DAR, in the EA and in the ILAC, the changes have scarcely any effects. Much will depend on good cooperation between the parties concerned. The objective is to ensure that the DKD calibration laboratories continue to profit not only from the services of the accreditation body but also from the metrological know-how of the PTB.



## Die 52. Sitzung des Kuratoriums

Das Kuratorium traf sich am 15. und 16. März 2001 zu seiner 52. Jahrestagung in Braunschweig. Nach der Besichtigung von ausgewählten Experimenten in den Fachlaboratorien fand am Nachmittag ein wissenschaftliches Kolloquium statt. Themen der Vorträge waren „Zündung von explosionsfähigen Gemischen durch hochfrequente Gasentladungen – Explosionsschutz kontra Verbrennungskraftmaschine“, „Anwendung kohärenten Weißlichts“ sowie „Nachweis seltener Zellen im Blut: Erkennung des Malariabefalls mittels Laser-Durchflusszytometrie“. Im Anschluss fanden Fachgespräche in den Abteilungen statt.

In der Sitzung am 16. März berichtete der Präsident des Kuratoriums, Dr. E. Röhling, u. a. über ein neues Förderprogramm zur „Leistungssteigerung der technisch-ökonomischen Infrastruktur zu Gunsten der deutschen Wirtschaft, insbesondere der kleinen und mittleren Unternehmen“. Von 30 geförderten Projekten werden 14 unter Beteiligung der PTB durchgeführt, drei davon gemeinsam mit der BAM.

Einen Schwerpunkt im Bericht des Präsidenten der PTB, Prof. Göbel, stellten die geplanten großen Baumaßnahmen dar: die Nachnutzung des Reaktorgebäudes für den wissenschaftlichen Gerätebau, die Gebäudesanierung und der Anbau für Elektronenbeschleuniger für die Dosimetrie hochenergetischer Photonen- und Elektronenstrahlen für die Strahlentherapie sowie der Bau eines Laborgebäudes mit einem Kompaktspeicherring für die UV- und EUV-Metrologie und -Technologie. Das Kuratorium hält es für dringend erforderlich, diese Baumaßnahmen schnell zu beginnen und zügig abzuschließen. Ferner wurde die Empfehlung ausgesprochen, das wichtige Arbeitsgebiet der Messtechnik für die molekulare Medizin aufzugreifen.

In einem gesonderten Tagesordnungspunkt wurde die geplante Evaluation der PTB erörtert. BMWi und PTB möchten durch die Evaluation, die durch ein internationales Expertenteam durchgeführt wird, eine objektive Bewertung für die strategische Ausrichtung des Aufgabenspektrums der PTB sowie über die Qualität der Aufgabenbewältigung erhalten.

## The 52nd Meeting of the Board of Advisors

On March 15 and 16, 2001, the Board of Advisors met for its 52nd annual meeting in Braunschweig. After inspection of selected experiments, a scientific colloquy was held. The subjects of the lectures were “Ignition of explosive mixtures due to high-frequency gas discharges – explosion protection versus combustion engine”, “Application of coherent white light” and “Detection of rare cells in the blood: diagnosis of malaria attacks by means of laser flow cytometry”. Afterwards, technical discussions were held at the divisions.

At the meeting of March 16, the president of the Advisory Board, Dr. E. Röhling, reported, among other things, on a new promotion program for the “Increase in efficiency of the technical-economic infrastructure for the benefit of the German economy and the small and medium-sized enterprises in particular”. 14 of the 30 funded projects are implemented in cooperation with the PTB and three of these together with the BAM.

The report of the President of the PTB, Professor Göbel, was focused on the planned large-scale construction measures: the reuse of the reactor building for the Scientific Instrumentation Section, the rehabilitation and extension of the building for electron accelerators for the dosimetry of high-energy photon and electron beams for radiation therapy as well as the construction of a laboratory building with a compact storage ring for UV and EUV metrology and technology. The Board of Advisors thinks it is absolutely essential to start these construction measures soon and to complete them promptly. Furthermore, it recommended tackling metrology for molecular medicine, which is another important area of work.

In another item of the agenda, the planned evaluation of the PTB was discussed. The BMWi and the PTB hope the evaluation which will be carried out by an international team of experts will furnish objective results for the strategic orientation of the spectrum of tasks of the PTB and for how to handle these tasks.

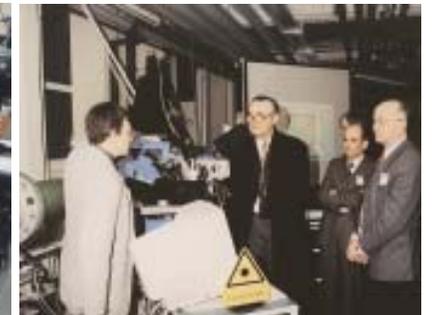
Im weiteren Verlauf der Sitzung berichteten Dr. F. Riehle über das Arbeitsgebiet „Optik“, Prof. M. Peters über Aktivitäten der PTB auf dem Gebiet „Mechanik und Akustik“ sowie Dr. J. Böhm über „Ionisierende Strahlung“. Abschließend referierte der Schatzmeister des *Helmholtz-Fonds e. V.*, R. von Siemens, über die Entwicklung des Fonds.

In the further course of the meeting, Dr. F. Riehle reported on the field of optics, Prof. M. Peters on PTB activities in the area of mechanics and acoustics, and Dr. J. Böhm on ionizing radiation. In conclusion, the treasurer of the *Helmholtz-Fonds e. V.*, R. von Siemens, reported on the development of the Fund.



Dr. Peschel erklärt Dipl.-Ing. R. v. Siemens, Dr. Scheuren, Prof. Kind, Dr. Sesselmann, Dipl.-Ing. Siewert und Dr. Schwartz (v. l.) die 20-kNm-Drehmoment-Normalmesseinrichtung.

Dr. Peschel explains the 20 kNm torque standard machine to R. von Siemens, Dr. Scheuren, Professor Kind, Dr. Sesselmann, Mr. Siewert and Dr. Schwartz (from left to right)



Dr. Müller erläutert Prof. Wagner, Dr. Szentiványi und Prof. Grasserbauer (v. l.) ein neues Verfahren für die Messung von 3-D-Strömungsgeschwindigkeitsfeldern in Rohrleitungen.

Dr. Müller explains a novel method for the measurement of 3D flow velocity fields in pipelines to Professor Wagner, Dr. Szentiványi and Professor Grasserbauer (from left to right)



Teilnehmer an der 52. Kuratoriumssitzung • Participants in the 52<sup>nd</sup> meeting of the Board of Consultants

### Persönliches:

Als neue Mitglieder des Kuratoriums wurden Prof. Dr. Monika Auwetter sowie Dr. Axel Anderlohr berufen.

Im Berichtszeitraum verstarben Ministerialdirektor a. D. Dr. Ernst von Beauvais (Präsident des Kuratoriums von 1973 bis 1988), Prof. Dr. Herbert Döring und Prof. Dr. h. c. Dr. Heinz Maier-Leibnitz.

### Personal data:

As new members of the Board of Consultants Professor Dr. Monika Auwetter and Dr. Axel Anderlohr were appointed.

During the period under report, Dr. Ernst von Beauvais (president of the Board of Consultants from 1973 to 1988), Professor Dr. Herbert Döring and Professor Dr. Dr. Heinz Maier-Leibnitz died.

### Helmholtz-Preis 2001

Neutrinoforschung auf der einen und Mikroskop-Technologie auf der anderen Seite sind die Themen, die der bedeutendste Preis der Metrologie, der Helmholtz-Preis, im Jahr 2001 gewürdigt hat. Der Preis, der alle zwei Jahre verliehen wird, ging zu gleichen Teilen von 20 000 DM an zwei Physikergruppen in Mainz und in Göttingen.

Dr. Jochen Bonn und Dr. Christian Weinheimer vom Institut für Physik der *Johannes-Gutenberg-Universität* in Mainz hatten sich in einer Arbeit mit dem Titel *High precision measurement of the tritium beta spectrum near its endpoint and upper limit on the neutrino mass* mit der Frage beschäftigt, ob Neutrinos eine Masse besitzen oder nicht. Durch Zerfallsexperimente an radioaktivem Tritium bestimmten die beiden Forscher sehr präzise eine Obergrenze dieser Masse.

Die Arbeit von Dr. Thomas A. Klar und Dr. Stefan W. Hell vom *Max-Planck-Institut für Biophysikalische Chemie* in Göttingen trägt den Titel *Durchbruch der Auflösungs Grenze in der Fernfeld-Fluoreszenzmikroskopie (STED-Mikroskopie)*. Ihr Verfahren macht es möglich, jetzt auch kleinste Strukturen in lebenden Zellen mit einem Lichtmikroskop zu erfassen.

Den Preis verleiht der *Helmholtz-Fonds e. V.*, dessen Vorsitzender der Präsident der PTB ist, gemeinsam mit dem *Stifterverband für die Deutsche Wissenschaft e. V.* Er wurde am 25. Juni in einer festlichen Veranstaltung in der PTB in Braunschweig überreicht.

Professor E. O. Göbel, Schatzmeister des Helmholtz-Fonds R. v. Siemens (3. und 4. von links) und die Preisträger 2001: C. Weinheimer, J. Bonn, S. Hell und T. Klar (von links)

Professor E. O. Göbel, R. von Siemens, treasurer of the Helmholtz-Fonds e. V. (3rd and 4th from left) and the 2001 award winners: C. Weinheimer, J. Bonn, S. Hell and T. Klar (from left)



### 2001 Helmholtz Award

Neutrino research on the one hand and microscope technology on the other are the subjects which in 2001 were deemed worthy of the Helmholtz Award, the most important prize in metrology. The award which is granted every two years was made in equal parts of 20 000 DM to two groups of physicists in Mainz and Göttingen.

In their work *High precision measurement of the tritium beta spectrum near its endpoint and upper limit on the neutrino mass*, Dr. Jochen Bonn and Dr. Christian Weinheimer of the Institute of Physics of the *Mainz University* had investigated whether or not neutrinos possess a mass. In decay experiments on radioactive tritium the two researchers very precisely determined an upper limit for this mass.

The work by Dr. Thomas A. Klar and Dr. Stefan W. Hell of the *Max Planck Institute for Biophysical Chemistry* in Göttingen is entitled *Durchbruch der Auflösungs Grenze in der Fernfeld-Fluoreszenzmikroskopie (STED-Mikroskopie)*. Their method now allows even very small structures in living cells to be detected using an optical microscope.

The prize is granted by the *Helmholtz-Fonds e. V.* with the President of the PTB as chairman, together with the *Stifterverband für die Deutsche Wissenschaft e. V.* It was awarded on June 25 within the scope of an official ceremony at the PTB in Braunschweig.

### Weiterbildung zum Fachhochschulingenieur

In der PTB, wie im öffentlichen Dienst allgemein, wird in den nächsten Jahren eine sehr große Anzahl erfahrener, sehr spezialisierter Ingenieure des gehobenen technischen Dienstes aus Altersgründen ausscheiden. Trotz der andauernden Stelleneinsparung von 1,5 % pro Jahr sind Stellen in diesem Bereich zur Besetzung frei. Weil es seit einigen Jahren äußerst schwierig ist, qualifizierte Bewerber zu finden, hat sich die PTB entschlossen, ein Kooperationsangebot der Fachhochschule Lübeck anzunehmen und Mitarbeitern aus dem mittleren Dienst (z. B. Technikern) die Möglichkeit des „Aufstiegs“ zum FH-Ingenieur zu eröffnen.

An den 15 Plätzen der ausgeschriebenen Fortbildungsmaßnahme haben 30 Mitarbeiter ihr Interesse bekundet. Leider konnte nicht allen eine Teilnahme ermöglicht werden. Die Kandidaten mussten die Zugangsvoraussetzungen für ein Studium erfüllen und einen dreiteiligen internen Test mit einer bestimmten Punktezahl bestehen. Außerdem durfte ein maximales Lebensalter nicht überschritten sein, und eine gute dienstliche Beurteilung war gefordert. Wer all diese Hürden genommen hat, darf nun berufsbegleitend in Lübeck Physikalische Technik studieren, und zwar mit denselben Inhalten und Anforderungen wie „normale“ Studenten.

Auf diesem Wege hofft die PTB, motivierte und gut ausgebildete Nachwuchingenieure

zu bekommen, die nicht nur eine fundierte Ausbildung erfahren haben, sondern außerdem Erfahrungen in sehr speziellen Arbeitsgebieten mitbringen.

### Advanced training as an engineer (technical college graduation)

At the PTB – as everywhere in the public service –, a very great number of experienced, highly specialized engineers of the higher intermediate service will in the next few years withdraw from working life on grounds of age. In spite of the ongoing job cuts of 1,5 % per year, there are vacancies in this area. As it has been extremely difficult for some years to attract qualified candidates, the PTB has decided to accept the cooperation scheme offered by the Lübeck Technical College and to offer members of the intermediate service (e. g. technicians) the possibility of graduating from a technical college.

Almost 30 employees have shown their interest in this advanced training measure but unfortunately it has not been possible for all of them to take part. The candidates had to fulfil the conditions for studies and reach a certain number of marks in a three-part internal examination. Furthermore, a maximum age was fixed and a good assessment required. Those who have cleared all these hurdles may now study physical technique in Lübeck – with the same contents and requirements as ordinary students.

The PTB hopes that this new approach will provide motivated and well-trained junior

engineers who not only have undergone sound training but also have practical experience in very specific areas of work.



Die PTB-Studenten  
PTB students

### Internationale Tagung zum Mess- und Eichwesen

Am 7. und 8. November fand im Kongresszentrum des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) in Berlin eine internationale Tagung über „Neue Herausforderungen für das Mess- und Eichwesen in Europa“ statt, die vom BMWi und der PTB gemeinsam organisiert worden war.

Globalisierung, Deregulierung und Harmonisierung des europäischen Messgerätemarkts – einschließlich einer neuen Richtlinie (MID) – verändern die klassischen Strukturen des gesetzlichen Messwesens. Bisher durch staatliche Stellen wahrgenommene Tätigkeiten wie z. B. die Ersteinrichtung sollen alternativ auch auf Hersteller und private Prüflaboratorien übertragen werden. Maßnahmen wie Akkreditierung, Zertifizierung von Qualitätsmanagementsystemen, Harmonisierung europäischer Normen und der Wunsch nach neuen Regelungen zum Verbraucherschutz begleiten die Forderungen nach freiem Warenverkehr.

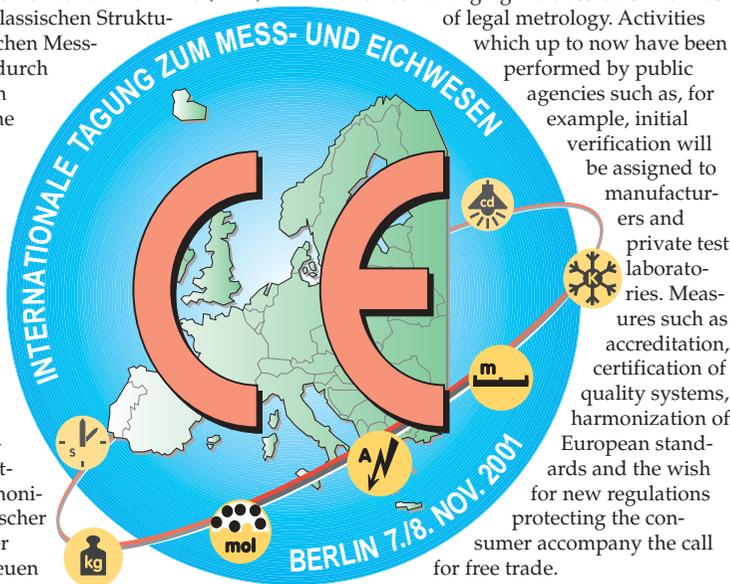
Nach der Eröffnung durch den Präsidenten der PTB, Prof. Ernst O. Göbel, hielt Dr. Alfred Tacke, Staatssekretär im BMWi, eine Grundsatzrede zum Stellenwert des gesetzlichen Messwesens, gefolgt von 14 weiteren Sprechern. Die Veranstaltung war mit 230 Teilnehmern aus 26 Nationen ausgebucht. Auch die Regionalorganisation *Euro-asiatische Zusammenarbeit nationaler Metrologie-Institutionen* (COOMET) war mit ihrer Arbeitsgruppe „Gesetzliches Messwesen“ auf der Tagung zahlreich vertreten. Die Vorträge werden in einem gesonderten Tagungsband zusammengefasst.

### International Conference on Metrology and Verification

At the Congress Centre of the *Federal Ministry of Economics and Technology* (BMWi) in Berlin, on November 7 and 8, an international conference on “New challenges to metrology and verification in Europe” was held, which had been organized by the BMWi and the PTB.

Globalization, deregulation and harmonization of the European measuring instrument market – including a new directive, the MID – have been changing the classical structures of legal metrology. Activities which up to now have been performed by public agencies such as, for example, initial verification will be assigned to manufacturers and private test laboratories. Measures such as accreditation, certification of quality systems, harmonization of European standards and the wish for new regulations protecting the consumer accompany the call for free trade.

After the opening address by Professor Ernst O. Göbel, the President of the PTB, Dr. Alfred Tacke, undersecretary at the BMWi, made a speech on the significance of legal metrology. He was followed by 14 other speakers. With 230 participants from 26 countries the event was booked out. The regional organization *Euro-Asiatic Cooperation of National Metrology Institutes* (COOMET), too, took part with its Legal Metrology Working Group. The lectures are compiled in particular proceedings.



### maßstäbe – das wissenschaftsjournalistische Magazin der PTB

Die PTB in Zügen und Klassenzimmern – das gab es im Herbst 2001 zum ersten Mal. Mit dem neuen Wissenschaftsmagazin *maßstäbe* sollen gerade diejenigen, die die PTB bisher noch nicht kannten, einen Einblick in die Welt der Metrologie bekommen: Schüler und Studenten, aber auch der Mann oder die Frau „von nebenan“. Das Ziel ist nicht ganz uneigennützig: In Zeiten, in denen sowohl Geld als auch Nachwuchs knapp werden, müssen mehr Menschen davon überzeugt werden, dass naturwissenschaftliche Forschung alles andere als ein Randthema ist.

Nichts und niemand bleibt im Leben von Messungen verschont – ein idealer Anknüpfungspunkt, um das Thema Physik aus der Hinterbank ganz nach vorne zu holen. Dass es funktioniert, beweisen viele hundert Bestellungen von Lehrern. Als Klassensätze über das ganze Bundesgebiet verstreut, dürften die *maßstäbe* jetzt dafür sorgen, dass einige Schüler nicht mehr nur (zum Beispiel) stur die Definition der SI-Basiseinheit Meter auswendig lernen, sondern bei dieser Gelegenheit eine spannungsreiche Geschichte über zwei Franzosen lesen, die mitten in den Wirren der Französischen Revolution Kopf und Kragen für die Wissenschaft riskierten – nur ein Beispiel aus dem ersten Heft zum Thema „Dimensionen der Einheiten“.

Ein- bis zweimal pro Jahr werden die *maßstäbe* jeweils ein Thema rund um die Metrologie aufgreifen und in vielfältiger Weise aufbereiten: journalistisch geschrieben, optisch und inhaltlich vielfältig, soll das Magazin Nachschlagewerk und Unterrichtsstoff, aber auch einfach Lesestoff sein. Es kann kostenlos bei der *Presse- und Öffentlichkeitsarbeit* bestellt werden.

### maßstäbe – the scientific journal of the PTB

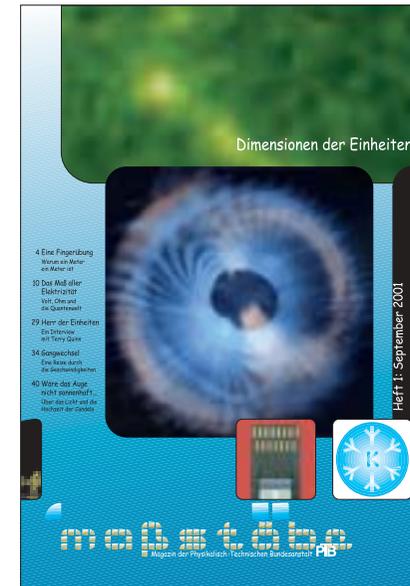
PTB presence in trains and classrooms – this vision became true for the first time in autumn 2001 with the new scientific journal *maßstäbe*. Those who do not yet know the PTB can now gain an insight into the world of metrology: pupils and students – but also the man and the woman next door. This aim is not an unselfish one: In times in which both money and junior staff are running short, the citizens must be convinced that scientific

research is not at all a marginal subject.

Nothing and nobody is spared measurement – an ideal starting point to move physics from the back bench into the focus of attention. That this works is proved by many hundreds of orders from teachers. Distributed over the whole republic, the *maßstäbe* might now ensure that some pupils will no longer stubbornly learn by heart the definition of the SI base unit of metre but read the thrilling story of two Frenchmen who in

the midst of the turmoil of the French Revolution risked their neck for science – only one example from the first number “Dimensions of the units.”

Once or twice a year the new journal – which is published only in German – will deal with a metrological subject and approach it in various ways: written in a journalistic manner and optically appealing, the journal is meant to be not only a reference book and a teaching aid but also simple reading material. It can be obtained free of charge from the *Press and Public Relations Office*.



### Abschied vom Standort Berlin-Friedrichshagen

Mit der deutschen Vereinigung wurden im Jahr 1990 Teile des Bereichs *Meßwesen* des *Amtes für Standardisierung, Meßwesen und Warenprüfung* (ASMW) der DDR in die PTB integriert. Zug um Zug wurde auch das ehemalige ASMW-Gelände in Berlin-Friedrichshagen an die PTB übertragen. Schließlich trat für die erweiterte PTB am 15. Oktober 1991 eine neue Organisationsstruktur in Kraft. Sie sah unter anderem eine Konzentration auf die Standorte Braunschweig und Berlin-Charlottenburg vor, die jetzt mit der Rückgabe der Liegenschaft Friedrichshagen an den Bund im Wesentlichen abgeschlossen ist. Künftig wird dort die Stiftung Preußischer Kulturbesitz während der Neugestaltung der Berliner Museumsinsel Ausstellungen vorbereiten.

Mit einer Festveranstaltung unter dem Titel „Die PTB zehn Jahre nach der deutschen Vereinigung“ verabschiedeten sich am 2. Oktober die PTB und vor allem viele ehemalige ASMW-Mitarbeiter von dem Standort Friedrichshagen. Wie Ministerialdirigent Dr. Lorenzen vom *Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie* (BMWi) in seinem Grußwort betonte, gibt die PTB damit keineswegs ihr Engagement im Osten Berlins auf. Das Synchrotronstrahlungslabor der PTB bei BESSY II trage wesentlich zur Attraktivität des Wissenschaftsstandorts Berlin-Adlershof bei.

### Saying good-bye to the Berlin-Friedrichshagen site

With the German unification in 1990, parts of the *Metrology Division* of the *Amt für Standardisierung, Meßwesen und Warenprüfung* (ASMW) of the GDR were integrated into the PTB. Also, the former ASMW terrain in Berlin-Friedrichshagen was transferred step by step to the PTB. Finally, on October 15, 1991, the expanded PTB was given a new organization structure which, among other things, provided a concentration on the sites of Braunschweig and Berlin-Charlottenburg. This measure has now been completed with the transfer of the Friedrichshagen estate to the Federal Republic as federally owned land and its future use – within the scope of the reorganization of the Berlin Museum Island – for the preparation of exhibitions.

With a farewell event on October 2, 2001, with “The PTB ten years after German unification” as a motto, the PTB and above all many former ASMW members said good-bye to the Friedrichshagen site. As Dr. Lorenzen from the *Federal Ministry of Economics and Technology* (BMWi) stressed, the PTB does not put an end to its commitment in the East of Berlin. The Synchrotron Radiation Laboratory of the PTB at BESSY II will substantially contribute to the attractiveness of Berlin-Adlershof as a location for science.

Letzte Veranstaltung der PTB am Standort Berlin-Friedrichshagen. In der ersten Reihe (Mitte) Prof. Kind neben Prof. Lilie (Präsident des ehemaligen ASMW) und dazwischen in der zweiten Reihe Dr. Möbius (Vizepräsident des Bereichs Meßwesen des ASMW).

Last event of the PTB at the Berlin-Friedrichshagen site. In the first row (centre): Professor Kind beside Professor Lilie (President of the former ASMW), and between them, in the second row, Dr. Möbius (Vice-president of the Metrology Division of the ASMW).

### Promotionen 2001

#### Staff members who attained their doctorates in 2001

Thomas Binnewies (4.31)	Neuartige Kühlmethoden zur Erzeugung ultrakalter Ca-Atome
Tarek Boutkedjirt (1.4)	Verbesserung der lateralen Auflösung von piezoelektrischen Hydrophonen durch numerische Verfahren
Jens Ebbecke (2.41)	Untersuchungen zum Einzelelektronentransport mit akustischen Oberflächenwellen
Ingo Gillandt (5.21)	Analyse der Turbulenzmodulation im dispersen zweiphasigen Freistrahler
Peter Grübling (7.11)	Untersuchung der Strahlungscharakteristik eines resonant mikrowellengeheizten Plasmas im Vakuum-UV
Wolfgang Kilian (8.12)	Erzeugung von hyperpolarisiertem $^{129}\text{Xe}$ -Gas und Nachweis mittels In-vivo-NMR-Bildgebung, NMR-Spektroskopie sowie SQUID-Messtechnik
Thomas Koschny (Q.104)	Zur Energie in der Chern-Simons-Feldtheorie für das halbgefüllte tiefste Landauband
Olaf Rienitz (3.22)	Entwicklung chemisch-analytischer Primärmethoden zur Bestimmung physiologisch relevanter anorganischer Bestandteile in Humanserum
Frank Roos (6.42/Q.2)	Entwicklung einer Messeinrichtung zur Bestimmung der Nachweiswahrscheinlichkeit von Neutronendetektoren mit assoziierten Teilchen der (n, p)-Streuung
Sivinee Sawatdiaree (Q.103)	Thermodynamics of the fractional quantum Hall system: the high-temperature expansion method
Lars Siebert (7.32)	Magnetfeldabhängigkeit der thermischen Eigenschaften von Multikomponentengläsern bei tiefen Temperaturen
Janusz Szwabinski (Q.103)	Der dynamische Strukturfaktor von supraflüssigem Helium 4 oberhalb des Roton-Minimums
Volker Wilkens (1.43)	Dielektrische optische Interferenzschichthydrophone zur zeitlich und räumlich hochauflösenden Messung von Ultraschallfeldern
Matthias Wohlfahrt (7.32)	Untersuchung der dielektrischen Tieftemperaturanomalien von Mehrkomponentengläsern in Magnetfeldern
Andreas Wolf (4.3)	Der elektro-optisch parametrische Oszillator als neuartige Quelle frequenzstabiler kohärenter Strahlung
Andreas Zimbal (6.42/Q.202)	Bestimmung von Isotopenverhältnissen und Verunreinigungskonzentrationen in höchstem Silicium mithilfe der Prompt-(n, $\gamma$ )-Spektrometrie



# Zahlen und Fakten

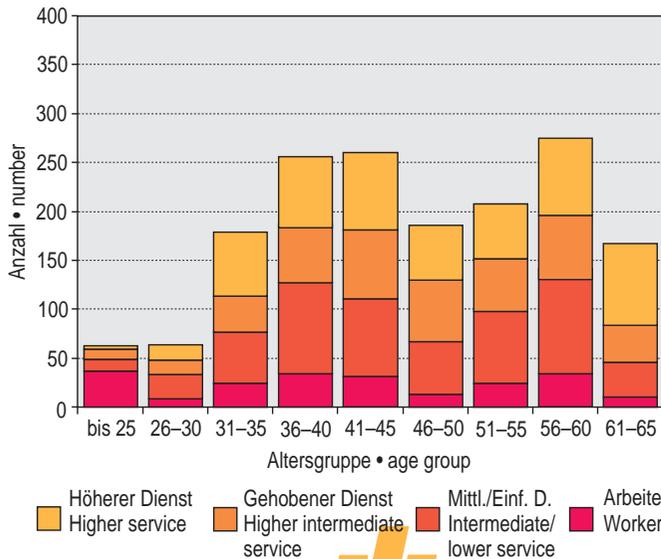
**Personal: Entwicklung • Staff: development**

Personelle Entwicklung von 1992 bis 2001 (Stand: 31. Dezember 2001) • Development of staff

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

Beschäftigungsverhältnis	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001
a)										
Beamte • civil servants	491	496	502	500	483	483	486	490	501	503
Angestellte • employees	937	903	877	868	869	850	827	821	808	786
Arbeiter • workers	260	264	259	246	242	234	227	223	201	204
Kasino personal • canteen staff	8	8	8	8	8	8	8	6	6	7
gesamt • total	1696	1671	1646	1622	1602	1575	1548	1540	1516	1500
b)										
Auszubildende • trainees	133	119	124	123	133	142	150	151	147	136
Aushilfskräfte temporary staff	37	38	44	22	16	19	35	32	44	52
Drittmittelpersonal staff members financed by third parties	100	79	92	93	104	85	110	70	92	104
Mitarbeiter gesamt staff member total	1966	1907	1906	1860	1855	1821	1843	1793	1799	1792

**Personal: Altersstruktur • Staff: age structure**



Altersstruktur der Mitarbeiter/innen unterschieden nach Laufbahngruppen (ohne Auszubildende)  
Age structure of staff distinguished by civil service groups (not including trainees)

**Ausbildung • Training (15. Oktober 2001)**

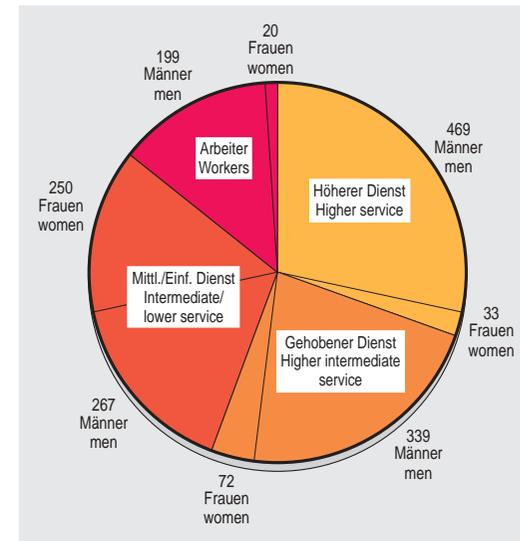
	BS	Berlin	
Kommunikationselektroniker	18 (5)	8 (2)	communication electronics technologists
IT-Systemelektroniker	15 (5)	-	information and telecommunication technologists
Physiklaboranten	17 (5)	-	laboratory technicians, physics
Mikrotechnologen	1 (0)	-	microtechnologists
Elektroinstallateure	15 (4)	-	electrical fitters
Feinmechaniker	9 (3)	7 (2)	precision mechanics
Maschinenbaumechaniker	12 (4)	-	machine construction mechanics
Fotografen	6 (1)	-	photographers
Technische Zeichner	4 (1)	-	draftsmen
Köche	5 (2)	-	cooks
Tischler	-	2 (1)	joiners
Fachangestellte für Bürokommunikation	-	10 (3)	specialists in office communications
gesamt	102 (30)	27 (8)	total

Die PTB gehört zu den größten Ausbildungsbetrieben in der Region. Gegenwärtig sind 129 Auszubildende bei der PTB angestellt (Stand: 15. Oktober 2001). 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. 129 trainees are at present employed by PTB (as of October 15, 2001). 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)



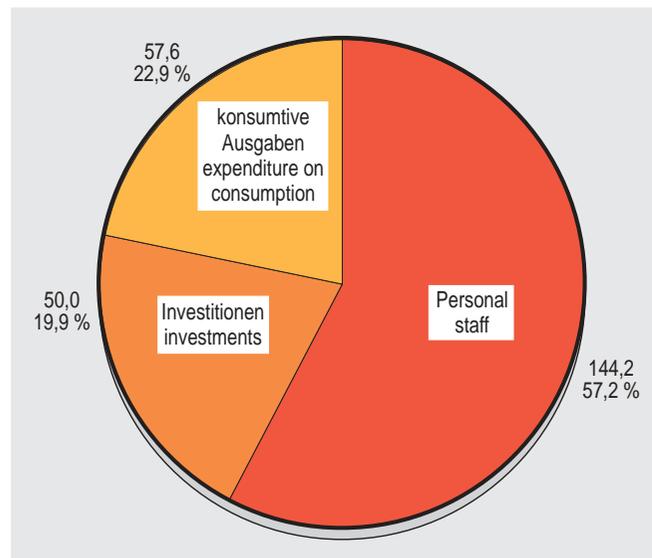
**Haushalt: Gebühren • Budget: charges**

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

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

Gebühren	1999	2000	2001	charges
Amtshandlungen und sonstige Gebühren	11 598	11 255	11 489	official acts and repayment work; other fees
Prüfung und Zulassung von Spielgeräten von Prüfstellen (Elektrizität)	2626	2966	2979	tests and approvals of gaming machines of test centres (electricity)
Leistungen im Rahmen des DKD	665	557	653	services rendered within the framework of DKD
gesamt	2118	1992	1962	total
gesamt	17 007	16 770	17 083	total

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



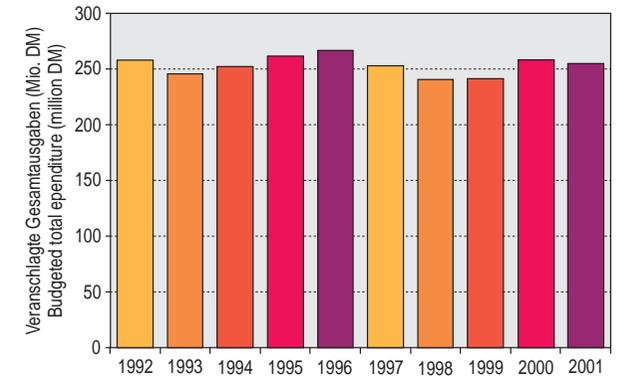
Die Grafik zeigt, wie sich im Berichtsjahr die veranschlagten Ausgaben verteilen (in Mio. DM). Zum Vergleich nennt die Tabelle die Vergleichszahlen der letzten Jahre.

The chart shows the break-down of the budgeted expenditure (in million DM) in the year under review. For comparison, the table indicates the figures of the past years.

**Ausgaben der PTB (in Mio. DM) • Expenditure of PTB (in million DM)**

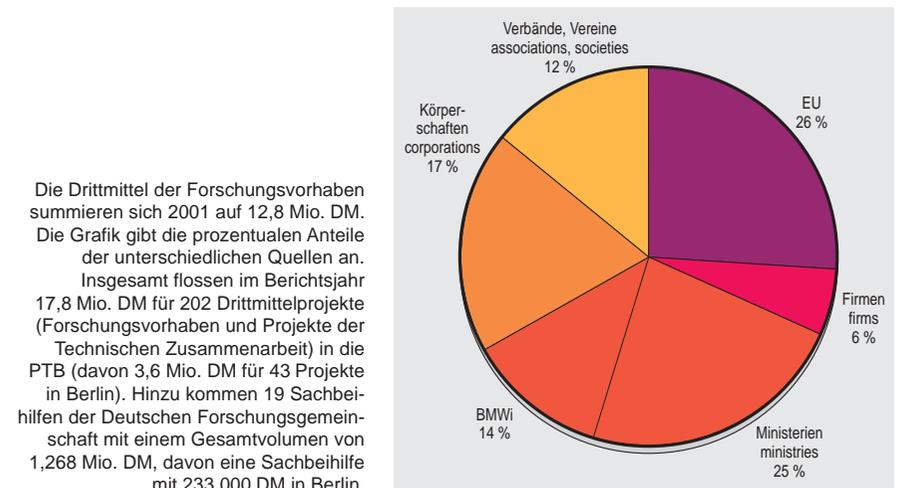
Haushaltsmittel	1999	2000	2001	budgetary means
Personalausgaben	144,1	144,7	144,2	staff costs
Investitionen (Bau und Geräte)	51,6	59,6	50,0	investments (building activities and instruments)
konsumtive Ausgaben	45,9	50,7	57,6	expenditure on consumption
gesamt	241,6	255	251,8	total

**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 2001 auf 12,8 Mio. DM. Die Grafik gibt die prozentualen Anteile der unterschiedlichen Quellen an. Insgesamt flossen im Berichtsjahr 17,8 Mio. DM für 202 Drittmittelprojekte (Forschungsvorhaben und Projekte der Technischen Zusammenarbeit) in die PTB (davon 3,6 Mio. DM für 43 Projekte in Berlin). Hinzu kommen 19 Sachbeihilfen der Deutschen Forschungsgemeinschaft mit einem Gesamtvolumen von 1,268 Mio. DM, davon eine Sachbeihilfe mit 233 000 DM in Berlin.

In 2001, the third-party funds for research projects added up to a total of 12,8 million DM. The chart shows the contributions (in percent) from the different sources. In the year under review, a total of 17,8 million DM flew into PTB for 202 third-party projects (research projects and technical cooperation projects), 3,6 million DM of these for 43 projects in Berlin. Added to this are 19 contributions in kind from the Deutsche Forschungsgemeinschaft with an overall volume of 1,268 million DM, one of these contribution with a volume of 233 000 DM for Berlin.

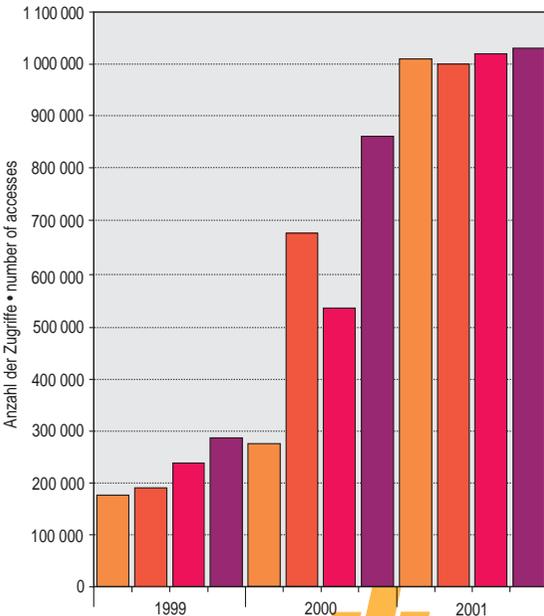
**Umwelt: Verbrauchszahlen • Environment: consumption figures**

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

... in Braunschweig		1999	2000	2001	
elektrische Energie	MWh	22 533	23 032	20 821	electrical energy
Wärme	MWh	23 431	22 815	22 812	heat
Gas	m <sup>3</sup>	45 611	44 774	38 032	gas
Wasser	m <sup>3</sup>	114 741	105 112	11 221	water
Abfälle:					waste produced:
hausmüllähnliche					
Gewerbeabfälle	t	106	117	103	refuse-like industrial waste
recycelte Abfälle	t	157	250	241	recycled waste
Sonderabfälle	t	14	20	14	hazardous waste
Entsorgungskosten (ca.)	DM	228 000	268 000	276 000	waste disposal costs (approx.)
... in Berlin		1999	2000	2001	
elektrische Energie	MWh	4998	5249	4391	electrical energy
Gas	m <sup>3</sup>	2925	4243	5864	gas
Wasser	m <sup>3</sup>	71 496	69 440	45 662	water
Helium, flüssig	l	52 265	52 600	57 420	helium, liquid
Stickstoff, flüssig	l	88 170	74 160	76 554	nitrogen, liquid
Abfälle:					waste produced:
Reststoffe insgesamt (ca.)	t	250	272	350	residues, total (approx.)
hausmüllähnliche					
Gewerbeabfälle	t	42	60	25	refuse-like industrial waste
recycelte Abfälle	t	175	200	300	recycled waste
Sonderabfälle	t	10	12	25	hazardous waste
Entsorgungskosten (ca.)	DM	90 000	98 000	110 000	waste disposal costs (approx.)

Der Energieverbrauch und die Abfallmengen der PTB im Vergleich der letzten Jahre

Comparison of the energy consumed and the amounts of waste produced by PTB in the past years

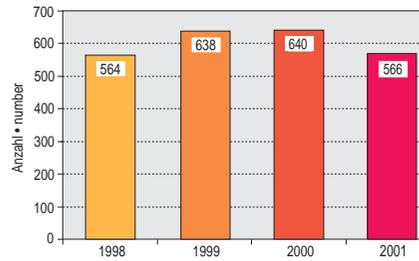


**Internet**

Vierteljährliche externe Zugriffszahlen auf den WWW-Server der PTB in den Jahren 1999 bis 2001. Nach einem Web-Relaunch im Juni 2000 präsentiert sich die PTB im Internet neu: mit einer neuen grafischen Oberfläche, unter einer neuen Navigation und mit neuen zusätzlichen Inhalten.

Quarterly accesses (external) to the PTB's www server between 1999 and 2001. After web relaunch in June 2000, PTB presents itself with a new look: a new graphical surface, with new navigation and additional new contents.

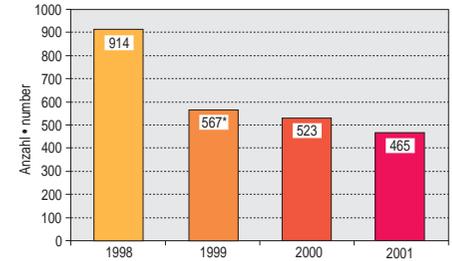
**Veröffentlichungen • Publications**



Anzahl der Veröffentlichungen der PTB-Mitarbeiter/innen (in wissenschaftlichen Journalen, Büchern, Tagungsbänden etc.) in den Jahren 1997 bis 2000 (vgl. Datenbank im Internet)

Number of publications by PTB staff members (in scientific journals, books, conference digests, etc.) between 1997 and 2000 (cf. database on the web)

**Vorträge • Lectures**



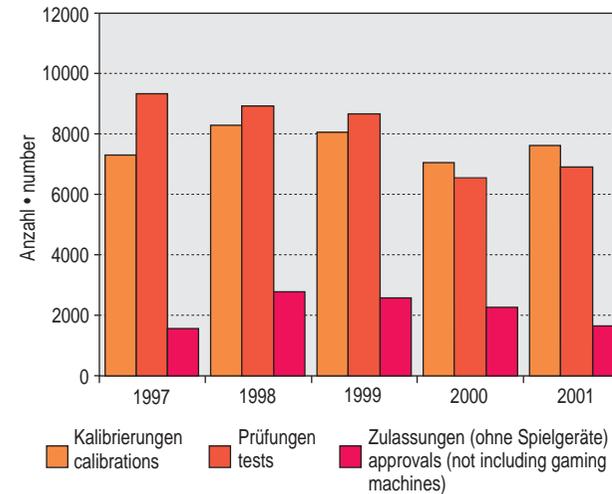
Anzahl der auswärtigen Vorträge, die PTB-Mitarbeiter/innen in den Jahren 1997 bis 2000 gehalten haben

\* ab 1999 geänderte Zählweise

Number of lectures held by PTB staff members outside PTB between 1997 and 2000

\* new counting method since 1999

**Kalibrierungen, Prüfungen, Zulassungen • Calibrations, tests, approvals**



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 2001 insgesamt 82 975 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).

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 82 975 approvals were granted in this field in 2001 (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).

Projektpartner der PTB PTB's project partners



**Internationale Angelegenheiten**

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 Konformitätsprüfung 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)* sowie weiteren regionalen und internationalen Gebern, wie der EU und der Weltbank, zur Verfügung gestellt. Im Berichtsjahr wurden 18 Länder in vier Kontinenten durch 27 Projekte beim Aufbau ihrer technischen Infrastruktur allein aus Mitteln des BMZ unterstützt. Der finanzielle deutsche Beitrag betrug mehr als 7 Mio. DM.

**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, 18 countries in four continents were assisted within the scope of 27 projects in setting up a technical infrastructure from BMZ funds alone. The German financial contribution was more than 7 million DM.

**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.

325 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. 1060 Besucher (in 48 Gruppen) passierten die Tore der PTB und blickten den Wissenschaftlern in deren Laboratorien über die Schultern. Die meisten Besucher waren dabei Schüler und Studenten.

**Guest scientists, guests and visitors**

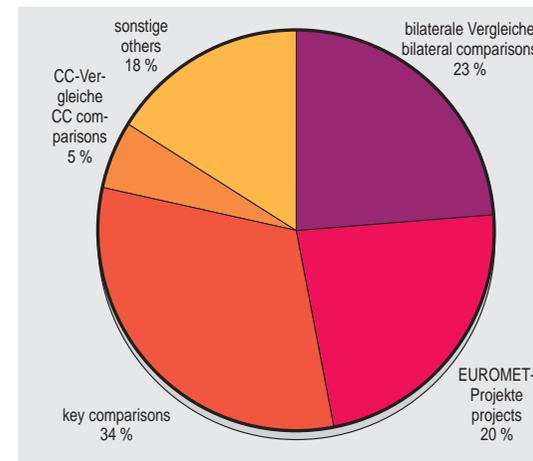
There is a worldwide interest in the PTB's work. Guest scientists, guests and visitors who came to PTB in the past year are proof of this.

325 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. 1060 visitors (in 48 groups) went through the PTB gate and watched the scientists work in their laboratories. Most of the visitors were pupils and students.

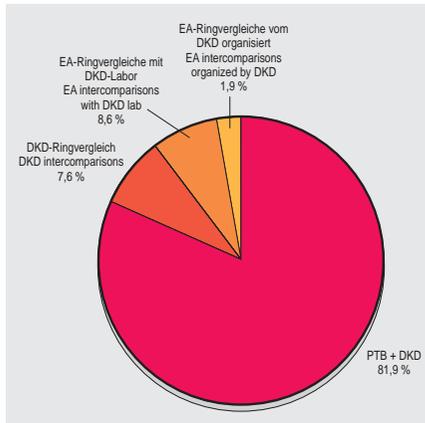
**Internationale Vergleichsmessungen • International comparison measurements**



In the year under review, the PTB participated in 44 comparison measurements, viz. 15 key comparisons, two CC comparisons (organized by the Consultative Committees of the International Committee for Weights and Measures, CIPM), nine regional comparisons within EUROMET, ten bilateral comparisons and eight other comparisons.

Die PTB nahm im Berichtsjahr an 44 Vergleichsmessungen teil und zwar an 15 Schlüsselvergleichen (key comparisons), zwei CC-Vergleichen (organisiert von den Beratenden Komitees des Internationalen Komitees für Maß und Gewicht, CIPM), neun regionalen Vergleichen innerhalb von EUROMET, zehn bilateralen Vergleichen und acht sonstigen Vergleichen.

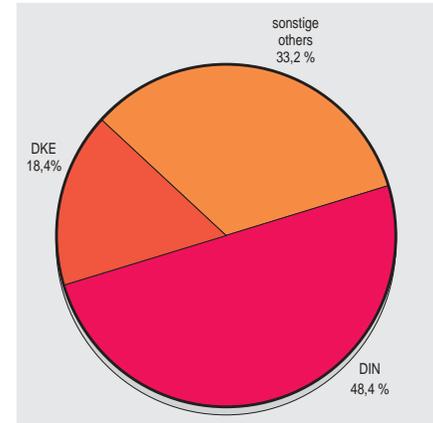
DKD-Vergleichsmessungen • DKD comparison measurements



Die im DKD akkreditierten Laboratorien (DKD-L) nahmen im Berichtsjahr an 105 Vergleichsmessungen teil. Den größten Anteil daran hatten 86 bilaterale Vergleichsmessungen zwischen der PTB und DKD-L (PTB + DKD), hinzu kommen acht DKD-Ringvergleiche mit mehreren DKD-L und der PTB als Referenzlaboratorium sowie EA-Ringvergleiche, die entweder vom DKD organisiert sind (2) oder an denen DKD-L teilnehmen (9).

In the year under review, the accredited DKD laboratories (DKDL) participated in 105 comparison measurements, the largest portion (86) being bilateral comparison measurements between PTB and DKDL (PTB + DKD). Added to this were eight DKD intercomparisons involving several DKDL, with the PTB acting as the reference laboratory, as well as EA intercomparisons, either organized by DKD (2) or involving DKDL (9).

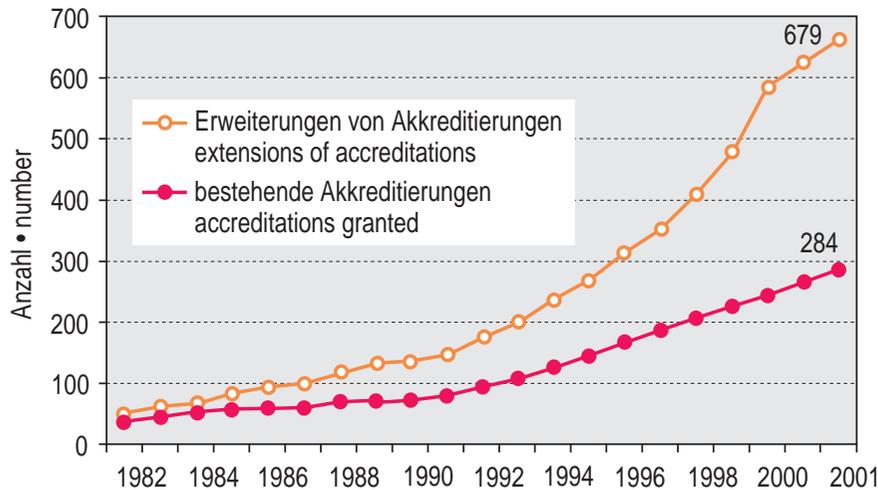
Nationales Messwesen: Gremienarbeit • Metrology on the national level: committee work



Prozentuale Verteilung der Gremienarbeit der PTB bei nationalen Normungsvorhaben. Innerhalb des *Deutschen Instituts für Normung e. V.* (DIN) war die PTB an 124 Normenvorhaben beteiligt, bei der *Deutschen Elektrotechnischen Kommission* (DKE) bei 47 Vorhaben.

Break-up of the PTB's committee work for national standardization projects (in percent). PTB cooperated in 124 projects of the *Deutsches Institut für Normung (DIN)* and in 47 projects of the *Deutsche Elektrotechnische Kommission (DKE)*.

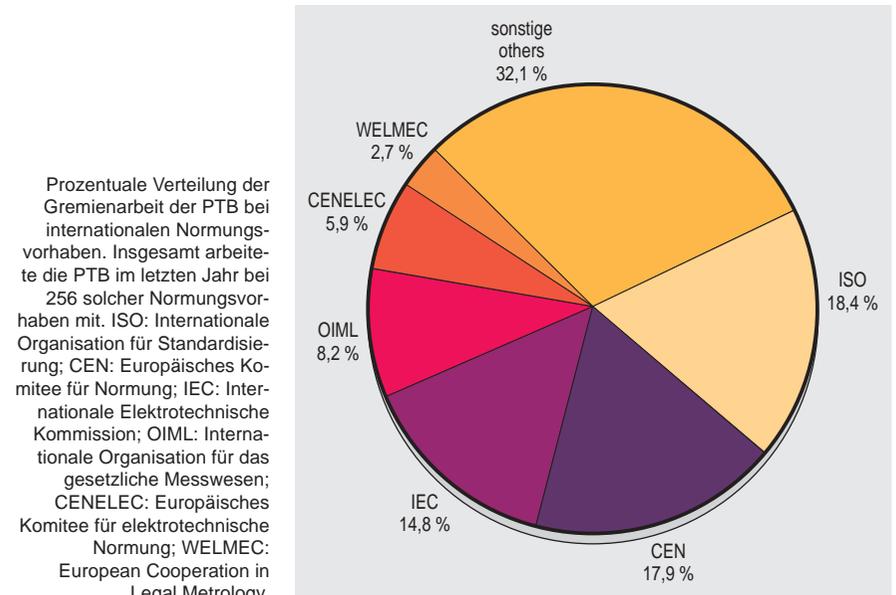
Deutscher Kalibrierdienst (DKD) • German Calibration Service (DKD)



Die Entwicklung des DKD und seine Akzeptanz bei den beteiligten Industriefirmen lässt sich nicht nur an der nach wie vor wachsenden Anzahl der akkreditierten Laboratorien ablesen, sondern auch an deren Erweiterungen. Die DKD-Laboratorien passen ihre Kalibriermöglichkeiten laufend den Erfordernissen des Marktes bzw. den gestiegenen Anforderungen an die Messgenauigkeit an. Die derzeitige Gesamtzahl akkreditierter DKD-Laboratorien resultiert aus 25 Akkreditierungen im Berichtsjahr, denen sieben Rücknahmen der Akkreditierungen, z. B. durch Firmenzusammenschlüsse, gegenüberstanden.

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

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 256 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.

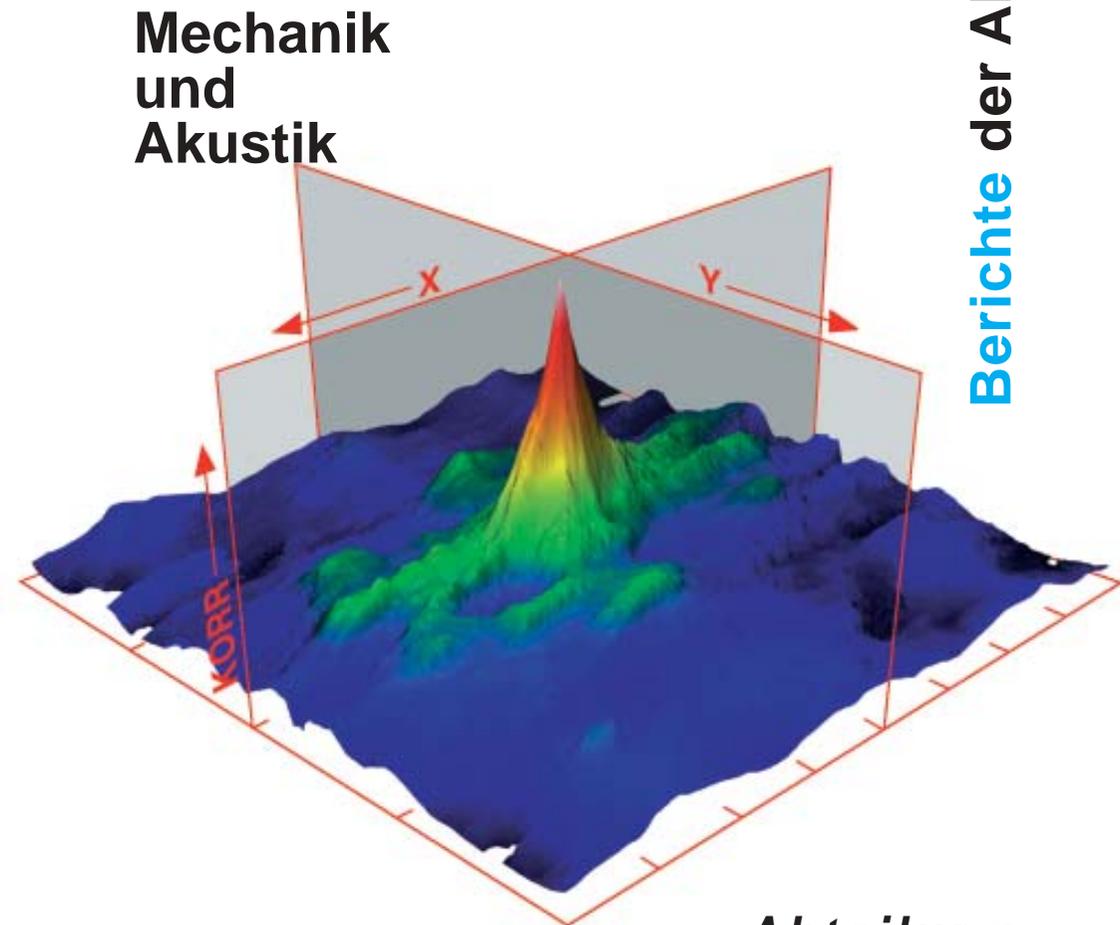
Break-up of the PTB's committee work for international standardization projects (in percent). In the past year, the PTB cooperated in 256 standardization projects of this kind. ISO: International Organization for Standardization; CEN: European Committee for Standardization; IEC: International Electrotechnical 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".



Berichte der Abteilungen

# Mechanik und Akustik

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 comparison) begonnen. Da sich diese Messungen über mehrere Jahre erstrecken, wird im diesjährigen Bericht allerdings noch nicht darauf eingegangen. Nachfolgend werden bedeutende Forschungsarbeiten und Entwicklungen aus der Abteilung vorgestellt.

## Festkörpermechanik

Mit dem Experiment Ionenakkumulation, das die Anbindung der Basiseinheit Kilogramm an die Atommasse von Gold zum Ziel hat, ist es erstmals gelungen, die Atommasse von Gold mit einer relativen Unsicherheit von 1,5 % und einer relativen Abweichung von 0,6 % gegenüber dem theoretischen Wert experimentell zu bestimmen. Zurzeit konzentrieren sich die Arbeiten auf folgende Schwerpunkte: Weiterentwicklung eines Schwing-

### Titelbild

Ein Ergebnis zweidimensionaler Kreuzkorrelation von Videobildern, die durch die Lichtschranken bzw. die piezoelektrischen Kabel der Referenz-Geschwindigkeitsmessanlagen der PTB im Straßenverkehr ausgelöst werden. Hiermit werden Einflüsse auf die Messgenauigkeit (z. B. bei Fahrzeugschwingungen) analysiert und kompensiert.

quarzarrays zur Messung der zweidimensionalen Masseverteilung von gestreuten Targetteilchen als Funktion der Ionenenergie, Entwicklung und Erprobung einer Vakuumwaage zur Wägung von akkumulierten Goldatomen mit einer Auflösung von  $0,1 \mu\text{g}$  bei einer Höchstlast von 1 kg, Erhöhung des Ionenstroms von zurzeit etwa  $10 \mu\text{A}$  auf mindestens 1 mA zur Erzeugung wägbarer Mengen von Gold.

Magnetische Kräfte zwischen einem Gewichtstück und der verwendeten Waage können insbesondere bei hochauflösenden Waagen bzw. Massekomparatoren einen Einfluss auf die Waagenanzeige haben. Dieser Einfluss wurde erstmals an fünf hochauflösenden Waagen mit elektromagnetischer Kraftkompensation durch systematische Messungen von Magnetfeldern sowie theoretische Berechnungen der Kraftwirkung auf Gewichtstücke unterschiedlicher Größe untersucht (Bild 1). Ein wesentliches Ergebnis sind experimentell ermittelte Grenzwerte für die magnetischen Eigenschaften von Gewichtstücken höherer Genauigkeitsklassen.

Auf dem Gebiet der dynamischen Kraftmessung konnten die Messverfahren zur quasistatischen Kalibrierung von piezo-

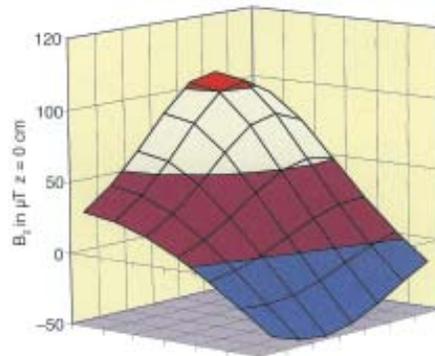


Bild 1: Vertikale Komponente  $B_z$  des Magnetfelds über einer Waagschale

elektischen Kraftmessgeräten durch Berücksichtigung von Drifteinflüssen verbessert werden. Ferner wurden die dynamischen Messverfahren zur Reduzierung der Messunsicherheit um interferometrische Messmethoden erweitert. In vielen Anwendungen sind aber noch grundlegende Fragestellungen hinsichtlich der auftretenden dynamischen Kräfte zu untersuchen. So werden im Rahmen eines Forschungsvorhabens die in Anwendungen der Automobilindustrie (z. B. Crashversuche) auftretenden Effekte näher analysiert und geeignete Messverfahren, insbesondere zur Kraftstoßkalibrierung, entwickelt.

Mit der bauseitigen Fertigstellung des Erweiterungsbaus am Gauß-Bau begann Ende 2000 die Montage der beiden Kraft-Normalmess-einrichtungen 2-MN-K-NME (Bild 2) und 5-MN-K-NME in Braunschweig. Neben den erforderlichen Modernisierungsarbeiten lag das Hauptaugenmerk auf dem Neuanschluss der Belastungsmassen der 2-MN-K-NME. Hierzu war die Neuentwicklung eines Massekomparators erforderlich, mit dem die Anschlussmessungen der insgesamt 60 Belastungsmassen von je 1 t, 2 t und 5 t Stückgewicht parallel zur Montage der Anlagen durchgeführt werden konnten. Durch intensive Untersuchungen zum Auffinden systematischer Fehlereinflüsse sowohl von magnetischen Wechselwirkungen zwischen Prüfling und Waage als auch zu Einflüssen der Steifigkeit des Waagenunterbaus konnte sichergestellt werden, dass die relative Unsicherheit der Massebestimmungen bei etwa  $2 \cdot 10^{-6}$  ( $k = 2$ ) liegt.

Nachdem 1999 mit dem japanischen Partnerinstitut NMIJ (*National Metrology Institute of Japan*) das erste „Memorandum of Understanding“ zur gegenseitigen Anerkennung von Prüfergebnissen für nichtselbsttätige Waagen unterzeichnet worden war, erfolgte im Jahr 2001 die Unterzeichnung einer entsprechenden Vereinbarung mit vier Instituten der Volksrepublik China, u. a. dem NIM

(*National Institute of Metrology of China*). Dieses Abkommen beinhaltet nicht nur die Anerkennung von Prüfberichten nach OIML R76 für nichtselbsttätige Waagen, sondern auch von solchen nach OIML R60 für Wägezellen.

## Kinematik

Fahrpreisanzeiger (Taxameter) und Wegstreckenzähler sind Messgerätearten im Straßenverkehr, bei denen der technische Fortschritt einerseits, aber auch gesellschaftspolitische Entwicklungen Diskussionen und Untersuchungen zu folgenden neuen Fragenkomplexen initiiert haben: Können Taxameter auch zur Bekämpfung illegaler Beschäftigungsverhältnisse im Taxengewerbe eingesetzt werden? Wie ist das gewerblich betriebene sogenannte „Car Sharing“ den Anforderungen des Eichgesetzes entsprechend zu gestalten? Wie können die im Ausland bereits verfügbaren „Bordcomputer“ in Mietwagen den vielfältigen finanzbuchhalterischen Aufgaben eines Taxenbetriebes einerseits, aber auch den deutschen eichamtlichen Erfordernissen des Verbraucherschutzes bei der Taxenfahrt-Abrechnung gerecht werden? Lässt sich eine telemetrische Umstellung von Taxentarifparametern durch „Software-Download“ über Funkverbindung den Erfordernissen eichamtlicher Überwachung und Sicherung entsprechend realisieren? Es wurden zunächst Übergangslösungen entwickelt, da politische Entscheidungsprozesse und internationale Abstimmungen zwar eingeleitet wurden, aber noch nicht abgeschlossen sind.

Weitere, gesellschaftlich stark beachtete Messgerätearten stellen die Geschwindigkeitsmessgeräte zur amtlichen Überwachung des Straßenverkehrs dar. Neuartige Entwicklungen mit dem Ziel, künftig bei der Dokumentation von Ordnungswidrigkeiten die Nassfilmtechnik durch Digitalkameras weitgehend abzulösen, erforderten nicht nur die Entwicklung entsprechender Prüfverfahren, sondern



insbesondere auch die Diskussion über Möglichkeiten künftiger Übertragung der digitalen Daten über offene Netze, was weitreichende eichtechnische Probleme aufwirft.

Die im Rahmen der Standortkonzentration im Vorjahr begonnene Verlagerung des Fachlaboratoriums *Beschleunigung* von Berlin-Friedrichshagen nach Braunschweig wurde im Jahre 2001 abgeschlossen. Für den Wiederaufbau der Normalmesseinrichtungen in den neuen Laborräumen wurden spezielle Schwingungsisolationsysteme entwickelt und realisiert, die sowohl die über die Fundamente einwirkenden Störschwingungen aus der Umgebung unterdrücken als auch die Reaktionskräfte der Schwingungs- und Stoßerreger von den Laserinterferometern abschirmen. Um diese kombinierte Anforderung an hochgenaue Primärkalibrierungen von Referenz- und Transfornormalen zu erfüllen, sind Beschleunigungs- bzw. Winkelbeschleunigererreger und Laserinterferometer auf getrennten Schwingungsisolationsblöcken aufgestellt, die über aufwändige Positionsregelung und aktive Schwingungsdämpfung verfügen (Bild 3).

Für sinusförmige Beschleunigungen wurde eine Niederfrequenz-Beschleunigungs-NME entwickelt, aufgebaut und erprobt. Mit maximaler Beschleunigungsamplitude von  $15 \text{ m/s}^2$  (max. Wegamplitude 8 cm, Frequenzbereich 1 Hz bis 63 Hz) ergänzt sie die Messmöglichkeiten der Tieffrequenz-Beschleunigungs-NME ( $2 \text{ m/s}^2$ , 0,5 m, 0,1 Hz bis 20 Hz). Die Entwicklung des nationalen Normals für Hochintensitäts-Stoßbeschleunigungen ( $1000 \text{ m/s}^2$  bis  $100\,000 \text{ m/s}^2$ ) steht kurz vor dem Abschluss. Die Erprobung des Stoßbeschleunigererregers hat bestätigt, dass mittels der neuartigen Impulsformtechnik oberwellenfreie Stoßbeschleunigungen in weitem Beschleunigungsbereich mit konstanter Stoßdauer angeregt werden können. Damit werden Resonanzanregung (z. B. des zu kalibrierenden Beschleunigungsaufnehmers) weitgehend vermieden und hochgenaue Linearitätsuntersuchungen an Aufnehmern möglich.

Bild 3 (rechts): Winkelbeschleunigungs-Normalmesseinrichtung; Schwingungsisolationsystem (aktiv schwingungs isoliert und positionsgeregt) mit Erreger und Interferometer

## Fluidmechanik

Im Fachlaboratorium *Strömungsmesstechnik* wurde für die Weitergabe der Einheit Strömungsgeschwindigkeit ein dreikomponentiges Laser-Doppler-Anemometer-System (LDA) an einem Niedergeschwindigkeits-Eiffel-Windkanal aufgebaut. Für die Kalibrierung von Anemometern kann das dreidimensionale Strömungsvektorfeld in der Messkammer des Windkanals vollständig mit und ohne Prüfling vermessen werden. Aus den gewonnenen Daten lassen sich neue Aspekte über die Rückwirkung des Prüflings auf das Strömungsfeld gewinnen.

Zur Realisierung geeigneter optischer Zugänge zu Rohrleitungen und Messdüsen im Hochdruckbereich bieten sich fasergekoppelte Optiken an. Der Einsatz von Glasfasertechniken erlaubt insbesondere auch die Implementierung einer optischen Vorverstärkung schwacher LDA-Signale. Hierzu wurden Untersuchungen zur Erweiterung der Leistungsfähigkeit eines Referenzstrahl-LDA (R-LDA) mit integrierten Neodymdotierten Faserverstärkern durchgeführt. Für ein 1064-nm-R-LDA konnten zwei in Reihe geschaltete Neodym<sup>3+</sup>-dotierte Faserverstärker als optische Vorverstärker für Streulichtsignale realisiert werden. In die Messstrecke gelangt nur noch der Beleuchtungsstrahl. Der Referenzstrahl wird gesondert mit dem in der Messstrecke von einer Einmodenfaser empfangenen und anschließend verstärkten Streulicht am Empfänger überlagert. Damit werden nur noch zwei optische Zugänge benötigt, die kleiner als 1 mm im Durchmesser sind. Die Messvolumenlänge des Referenzstrahl-Faser-

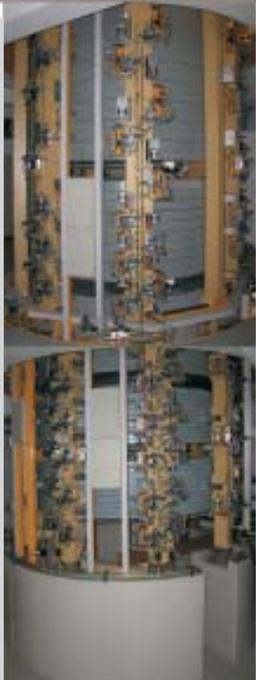
LDA konnte auf 100 mm erweitert werden, so dass die Möglichkeit besteht, in axialsymmetrischen Strömungen den Durchfluss in Rohren bis zu einem Durchmesser von DN200 ohne Traversierung zu messen.

Im Jahre 2001 wurde das Investitionsvorhaben „Hydrodynamisches Prüffeld“ in seinen wesentlichen Teilen abgeschlossen (s. Nachrichten des Jahres, Seite 20). Das Hydrodynamische Prüffeld wird das nationale Normal für die Darstellung und Messung der Menge und des Durchflusses strömender Flüssigkeiten. Die Messanlage arbeitet mit dem Messgut Wasser in einem Durchflussbereich von  $0,3 \text{ m}^3/\text{h}$  bis  $2100 \text{ m}^3/\text{h}$ . Angestrebt wird eine Standardmessunsicherheit von 0,01 %. Die entscheidenden Voraussetzungen für das Erreichen einer solch extrem niedrigen Messunsicherheit wurden bereits durch die messtechnische Konzeption der Anlage geschaffen, indem sie zwei voneinander völlig unabhängige Messverfahren miteinander kombiniert: Eine gravimetrisch arbeitende Messeinrichtung mit Wägesystemen und Umschaltklappen ist hydraulisch mit einem volumetrischen Normalverfahren (Rohrprüfstrecke) derart gekoppelt, dass es durch direkte Vergleichsmessungen beider Normalmesseinrichtungen möglich werden wird, die Auswirkung von bisher kaum realistisch abschätzbaren Einflussgrößen auf die Messunsicherheit zu erkennen und zahlenmäßig zu erfassen. Ein solches Konzept wird weltweit auf diesem Gebiet erstmalig realisiert.

Im Bereich der Hochdruck-Erdgasmessung hat sich die seit 1999 bestehende Zusammenarbeit der PTB mit dem niederländischen Staatsinstitut NMI bei der Harmonisierung der Volumeneinheit beider Länder bewährt. Die fortlaufende Kontrolle des gemeinsamen Bezugsniveaus dokumentiert die Stabilität der Harmonisierung und hat zu einer deutlich verbesserten Abrechnungssicherheit im grenzüberschreitenden Verkehr geführt. Auch innerstaatlich sind von Seiten der PTB die Kompetenzen im Bereich der Hochdruck-erdgasmessung weiter ausgebaut worden. Als wichtigstes Ergebnis ist hierbei die Übertragung des Hochdruckprimärnormals (Rohrprüfstrecke) der Bundesrepublik Deutschland in die nunmehr alleinige Verantwortung der PTB zu nennen.



Bild 2: 2-MN-Kraft-Normalmesseinrichtung



## Akustik

Im Fachbereich Akustik sind im Berichtszeitraum zwei herausragende Dissertationen abgeschlossen worden. Beide Arbeiten verfolgen das gleiche metrologische Ziel, die Verbesserung der lateralen Auflösung bei der Erfassung hochfrequenter Ultraschallfelder, jedoch mit unterschiedlichen Ansätzen.

Herkömmliche Hydrophone sind für die Messung von Ultraschallfeldern bei Frequenzen über 10 MHz nur bedingt verwendbar, da sie aufgrund ihrer Größe (Durchmesser 0,5 mm) einen Messwert liefern, der dem Mittelwert des Schalldrucks auf der Empfängerfläche entspricht. In der einen Arbeit konnte der Nachweis erbracht werden, dass die Feinstruktur des Schallfelds, wenn es in sehr kleinen Schritten (kleiner als die Schallwellenlänge) abgetastet wird, auch beim Einsatz herkömmlicher Hydrophone durch numerische Auswerteverfahren (Entfaltung) aufgelöst werden kann. In der zweiten Arbeit wurde ein neuartiger Hydrophontyp zur zeitlich und räumlich hochauflösenden Messung des Ultraschallwechseldrucks beschrieben. Im Gegensatz zu herkömmlichen Hydrophonen, die nach dem Prinzip des piezoelektrischen Empfängers arbeiten, basiert er auf der Verwendung von dünnen optischen Interferenzschichten als Sensorelement.



Bild 4: Messung des Schallpegels am Eingang des Gehörgangs mit Hilfe eines Kunstkopfes; das Ultraschallskalpell befindet sich links.

In der Bauakustik gewinnt die Schallintensitätsmessung zunehmend an Bedeutung, um beispielsweise gezielt die Schallleistungsflüsse durch einzelne Bauteile unter ansonsten nicht bekannten akustischen Umgebungsbedingungen zu bestimmen. Entscheidend für die Brauchbarkeit der Ergebnisse ist die Dynamik, d. h. der Unterschied zwischen Schalldruck und Schalldruckdifferenz an der Intensitätsmesssonde. Zur Bestimmung des Betrags des Intensitätsvektors werden alle drei Richtungskomponenten gemessen. Aufgrund empirischer Untersuchungen galt bisher ein Ergebnis als verwendbar, wenn mindestens zwei Komponenten eine ausreichende Dynamik aufwiesen. Im Gegensatz dazu konnte nun analytisch gezeigt werden, dass bereits eine Komponente mit ausreichender Dynamik genügt. Durch dieses neue Kriterium wird die Unsicherheit bei der Verwertung von Messergebnissen erheblich verringert.

Ultraschallchirurgiegeräte werden in steigendem Maße in der modernen offenen und endoskopischen Chirurgie eingesetzt. Sie stellen eine leistungsfähige Alternative zu bekannten Verfahren dar und ermöglichen insbesondere eine minimal invasive und blutungsfreie Durchtrennung von Gefäßen. Die Wirkungsweise beruht dabei auf einer Metallklinge, die von einem Hochleistungs-Ultraschallwandler in longitudinaler Richtung zu Schwingungen angeregt wird. Da die Klängen jedoch über äußere Abmessungen von mehreren Millimetern verfügen, stellen sie auch wirksame Sender von Ultraschallwellen dar. Diese Schallwellen werden sowohl durch die Luft als auch durch den Körper des Patienten während der Behandlung übertragen und können empfindliche Organe wie das Ohr erreichen. Die erste Voraussetzung für eine Einschätzung der Wirkung dieser Schallwellen ist die Messung der akustischen Ausgangsgrößen in Luft und Wasser, die in Zusammenarbeit mit der Firma Ethicon Endo-Surgery Norderstedt durchgeführt wurde. Hierbei konnten objektive Messwerte für die Emission von Ultraschall durch ein Ultraschallskalpell gewonnen werden. Diese Messwerte können als Grundlage für die Beurteilung der Wirkung von Ultraschall auf den Menschen im Frequenzbereich zwischen 20 kHz und 100 kHz dienen (Bild 4).

## In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

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

### Grundlagen der Metrologie

#### Neuer 5-t-Massekomparator

Speziell für den Neuanschluss der Belastungsmassen der von Berlin-Friedrichshagen nach Braunschweig umgesetzten 2-MN-Kraft-Normalmesseinrichtung wurde ein 5-t-Massekomparator entwickelt, mit dem die Massen der insgesamt 60 Belastungsscheiben (Nennwerte 1 t, 2 t und 5 t) mit einer relativen Unsicherheit von  $2 \cdot 10^{-6}$  bestimmt werden konnten. (1.13)

#### Das Hydrodynamische Prüffeld – nationales Primärnormal für die Mengen- und Durchflussmessung von strömendem Wasser

Höchstes wissenschaftlich-technisches Niveau ist notwendig, um sichere und genaue Messungen im Dienste des Verbrauchers zu gewährleisten – am Ende der Messkette auch mit dem Wasserzähler zu Hause. (1.301)

#### Vermessung der Richtungsabhängigkeit von Schallfeldern in Hallräumen

Durch eine trickreiche Messtechnik gelingt es, ein Mikrofonarray mit einem einzigen Mikrofon zu simulieren und damit dessen Richtungsselektivität deutlich zu steigern. (1.42)

### Metrologie für die Wirtschaft

#### Neuartiger Radar-Sensor misst gleichzeitig Geschwindigkeit und Abstand

Wenn Raser ertappt werden, sollen Zweifel auszuschließen sein. Ein intelligentes Messprinzip reduziert den personellen Aufwand bei der Bildauswertung und steigert die Messsicherheit. (1.2)

#### Einheitliche Normalhörschwellen für neue Testsignale beim Ohrenarzt

Bei Verwendung von Rechteckimpulsen (Clicks) für die Messung des Hörvermögens haben die Normal-Hörschwellenpegel für ganz unterschiedliche Kopfhörerarten im Gegensatz zu Tonsignalen alle etwa den gleichen Wert. (1.41)

### Metrologie für die Gesellschaft

#### Untersuchung der magnetischen Wechselwirkungen zwischen Gewichtstücken und Waagen zur Festlegung der Grenzwerte für Gewichtstücke in einer neuen OIML-Empfehlung

Die Magnetfelder von Waagen wurden gemessen und damit Grenzwerte für die magnetischen Eigenschaften von Gewichtstücken ermittelt. (1.11)

#### Fahrzeugmontierte Waagen im geschäftlichen Verkehr

Dem Trend, Wägungen dort vorzunehmen, wo sie gebraucht werden, folgen die fahrzeugmontierten Waagen, die bei Anwendungen im eichpflichtigen Verkehr wegen des besonderen Aufstellungsorts eigene eichtechnische, europäisch harmonisierte Regelungen erfordern. (1.14)

#### Automatische Prüfeinrichtung für Waagen bis 3 t

Die in einer Klimakammer installierte, weiter verbesserte Prüfeinrichtung ermöglicht es, die umfangreichen messtechnischen Prüfungen von eichpflichtigen Waagen nach der OIML-Empfehlung R76, einschließlich der Prüfungen auf Temperatur, des Einflusses feuchter Wärme und der Kennwertbeständigkeit, nahezu vollautomatisch und betriebssicher durchzuführen. (1.14)

#### Vereinfachte Untersuchung von Installationseffekten an Gaszählern auf Hochdruckprüfständen

Durch den Einbau einer Vorstörungsplatte konnte der technische Aufwand bei der Prüfung von Gasmessgeräten erheblich gesenkt werden. (1.33)

#### Akustische Ausgangsgrößen eines Ultraschallskalpells gemessen

Ultraschallchirurgiegeräte senden bei ihrer Nutzung zum Schneiden und Koagulieren Ultraschallwellen aus. Messungen des Schalldruckpegels in einem reflexionsarmen Raum und der in Wasser abgegebenen Ultraschallleistung schaffen die Voraussetzung für eine objektive Beschreibung der Schallemission. (1.43)

### Temperaturerhöhung in Gewebe bei Nutzung eines Ultraschallskalpells bestimmt

Bei der Nutzung von Ultraschallskalpellern entstehen lokal hohe Temperaturen. Durch Messung der Temperatur in Gewebe konnte geklärt werden, wie weit sich die Wärme in unbeteiligtes Gewebe ausbreitet. (1.43)

### Internationale Angelegenheiten

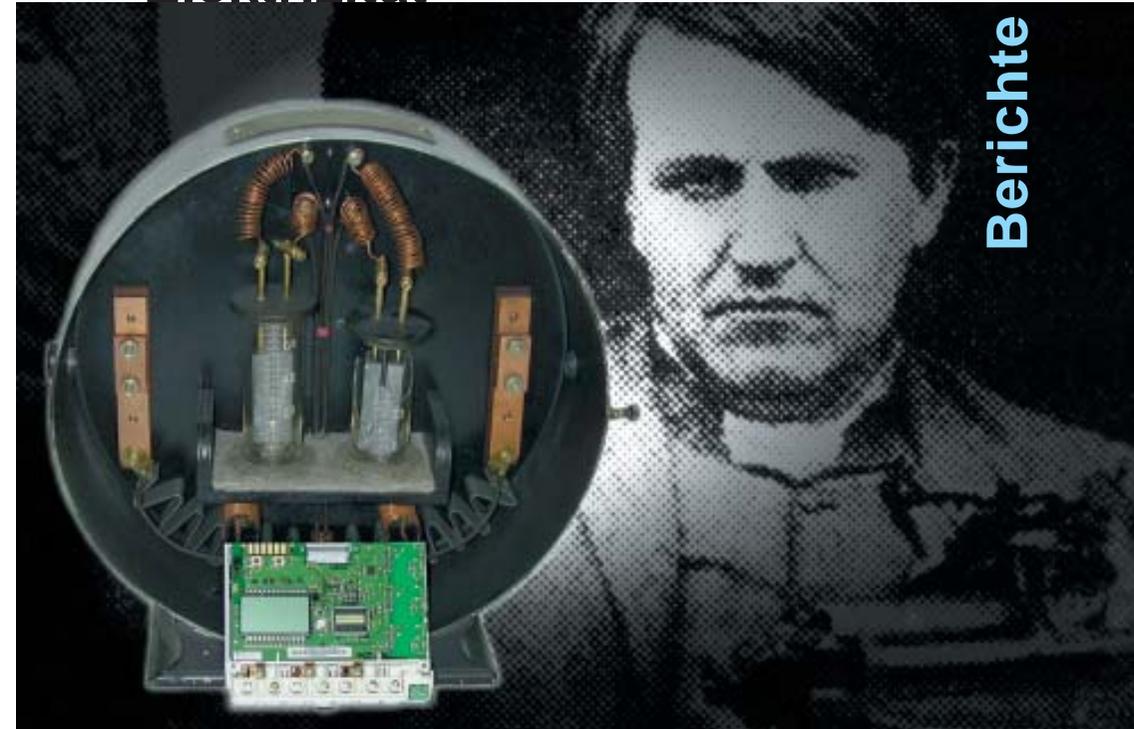
#### Schlüsselvergleiche mit Massenormalen

Die CIPM-Schlüsselvergleiche für den Bereich Masse wurden festgelegt. Das Masselabor hat einen CIPM-Schlüsselvergleich als Pilotlabor durchgeführt und nimmt an vier weiteren teil. (1.11)

### Ist eine gute Raumakustik planbar?

Leistungsfähige Simulationsprogramme sind ein wertvolles Hilfsmittel für die zweckorientierte Umsetzung von Architektenentwürfen in die Praxis. (1.401)

## Elektrizität



Abteilung



# Elektrizität

Die Arbeiten der Abteilung Elektrizität erstrecken sich über alle vier Arbeitsgebiete der PTB: die „Grundlagen der Metrologie“, die „Metrologie für die Wirtschaft“, die „Metrologie für die Gesellschaft“ und „Internationale Angelegenheiten“. Sie reichen von der Grundlagenforschung auf dem Gebiet der Quantenelektronik über neue Entwicklungen im industriellen und gesetzlichen Messwesen bis hin zu den internationalen Abkommen über die gegenseitige Anerkennung von Normalen und Zertifikaten, die im Rahmen der Globalisierung des Handels notwendig wurden.

Auch im Berichtsjahr 2001 waren die Aktivitäten der Abteilung darauf gerichtet, ihr Dienstleistungsangebot in einem permanenten Prozess an die Bedürfnisse ihrer Kunden anzupassen. Das beinhaltet erhöhte Kalibrieranforderungen hinsichtlich Genauigkeit und Umfang ebenso wie die Entwicklung neuer Messverfahren, wobei Kalibrierungen in zunehmendem Maße durch die Bewertung von Messverfahren und die Entwicklung neuer Messstrategien ersetzt werden. Messtechnik greift immer unmittelbarer in Fertigungsprozesse ein. Neue, besonders anspruchsvolle Technologien wie die Mikro- und Nanotechnik sind ohne eine entsprechend hochentwickelte Messtechnik überhaupt nicht denkbar.

Nachfolgend werden einige charakteristische Beispiele aus diesen Arbeitsgebieten vorgestellt.

**Titelbild**  
Symbiose von alt und neu: Der erste in Serie gebaute Elektrizitätszähler der Welt von T. A. Edison (historisches Modell aus dem Zählermuseum) im Vergleich zu moderner, in der PTB zugelassener Zähler-Technik. Edison, der geniale Telegraphiepionier, hätte im Wettbewerb heutiger, kommunikationsfähiger Zählertechnik sicher auch beachtenswerte Beiträge leisten können.

## Zerstörungsfreies Auslesen von Qubits

Einzelelektronen-Transistoren (SET) haben gänzlich neue Experimentiermöglichkeiten geschaffen. Sie besitzen die bemerkenswerte Eigenschaft, auch Bruchteile einer auf ihrer Mittelelektrode (Insel) befindlichen Elementarladung detektieren zu können. Damit erlauben sie es, Elektronentransport- und Rauschprozesse in verschiedenen mesoskopischen Strukturen zu untersuchen. In jüngerer Zeit ist auch der Einsatz von SET-Elektrometern für die Messung des Quantenzustands von Ladungs-Qubits in sog. Cooper-Paar-Boxen intensiv diskutiert worden. Bei solchen Messungen sind sowohl die Empfindlichkeit des Elektrometers als auch dessen Rückwirkungsfreiheit auf den Quanten-Zustand der Box von größter Bedeutung. Der auf die Bandbreite bezogene Energieauflösung des Detektors ist durch die Heisenbergsche Unschärferelation eine natürliche Grenze gesetzt, die bei  $1/2 \hbar$  liegt. Ein Detektor, der diese Grenze erreicht, kann als ideal, am Quantenlimit arbeitend, angesehen werden.

Mit normal leitenden SET kann diese Grenze nicht erreicht werden, wohl aber mit ihren supraleitenden Counterparts, den so genannten Bloch-Transistoren. Bei der vorgeschlagenen Elektrometerschaltung ist ein Bloch-Transistor in einen supraleitenden Ring eingefügt, der induktiv mit einem Oszillatorschwingkreis gekoppelt ist (Bild 1), wobei Phase und Amplitude der Oszillationen im Schwingkreis direkt von der Ladung auf der Insel des Bloch-Transistors abhängen. Theoretische Überlegungen lassen eine Empfindlichkeit von etwa  $3 \cdot 10^{-7} \text{ e/Hz}^{1/2}$  erwarten. Wenn neben dem Ring auch der Resonanzkreis supraleitend ist, kann das Elektrometer auch zur Detektion supraleitender Qubits verwendet werden, ohne die Quanten-Kohärenz unzulässig zu beeinflussen. Im Moment wird an der Umsetzung dieses Prinzips in die Praxis gearbeitet.

## Quantennormale für den Einsatz in industriellen Laboratorien

Quantennormale haben den Vorteil, dass sie eine inhärente Genauigkeit besitzen, die bei den elektrischen Normalen auf mesoskopischen Quanteneffekten in Verbindung mit Fundamentalkonstanten beruht. Sie sind unabhängig von Ort und Zeit und erlauben es damit, die durch sie repräsentierten Einheiten an beliebigen Orten zu reproduzieren. Dies geschieht nicht nur in den Nationalen Metrologischen Instituten (NMI), sondern zunehmend auch in Forschungseinrichtungen und Industrielaboratorien, weswegen man mittlerweile auch schon vom „shopfloor as NMI“ spricht.

Die auf dem Josephson- und dem Quanten-Hall-Effekt basierenden Normale für die Größen Gleichspannung und Gleichstromwiderstand werden bereits in Kalibrierlaboratorien von Forschungsinstituten und Industrie eingesetzt. Hier hat die Abteilung im Rahmen eines vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Vorhabens erfolgreich einen Technologietransfer vorgenommen und ein mittelständisches Unternehmen in die Lage versetzt, Spannungsnormale auf der Grundlage des Josephson-Effekts kommerziell anzubieten.

Bei Wechselstromanwendungen von Quantennormalen steht ein Industrieinsatz noch bevor. Auch hier ist die Abteilung dabei, mit Hilfe des ebenfalls vom BMBF geförderten Vorhabens „Quantenvoltmeter“ einen Techno-

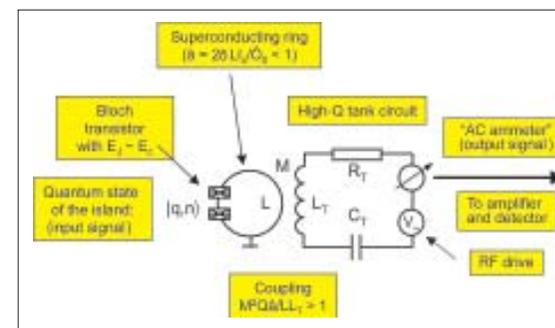


Bild 1: Elektrische Schaltung eines Elektrometers mit Bloch-Transistor mit supraleitendem Ring und eingefügtem Bloch-Transistor, induktiv angekoppelem Reihenresonanzkreis, Linearverstärker und Amplituden/Phasen-Detektor (von links)

logietransfer vorzubereiten. Beim Quanten-Hall-Effekt (QHE) bahnt sich eine ähnliche Entwicklung an. Sieben europäische Partner haben im Rahmen des von der EU geförderten Vorhabens „Modular System for the Calibration of Capacitance Standards Based on the Quantum Hall Effect“ gemeinsam ein System entwickelt, mit dem sich Impedanznormale auf den Wechselstrom-QHE zurückführen lassen. Das System wurde anlässlich eines in der PTB abgehaltenen Seminars vorgestellt (Bild 2) und ist auf großes Interesse gestoßen.

## Praktische Anwendungen für Sub-THz-Signale

Elektrische Pulse mit Anstiegszeiten im ps-Bereich werden unter anderem zur Charakterisierung von schnellen Sampling-Oszilloskopen und Pulsgeneratoren für EMV-Prüfungen benötigt. Gemeinsam mit dem Projekt 4.201 Femtosekunden-Messtechnik sind optoelektronische Wandler zur Erzeugung sowie elektro-optische Sampler zur Charakterisierung von ps-Impulsen entwickelt und erfolgreich getestet worden. Damit konnten auf koplaren Wellenleitungen Pulse mit Anstiegszeiten von weniger als einer Piko-sekunde erzeugt werden. Problematisch ist der Übergang auf Koaxialsysteme, wie sie für die Kalibrierung von Oszilloskopen benötigt werden. Das Übertragungsverhalten des zur Auskopplung in die Koaxialleitung benutzten Mikrowellenprobers kann bestimmt werden, indem der Pulsverlauf nach Reflexion an einem Kurzschluss und anschließender Ein-



Bild 2: Teilnehmer des QHE-Seminars begutachten das von sieben europäischen Partnern gemeinsam entwickelte System zur Kalibrierung von Kapazitätsnormalen auf der Grundlage des QHE

kopplung in die koplanare Wellenleitung erneut mit optischer Samplingtechnik gemessen wird. Aus der Differenz der Zeitparameter von Hin- und Rückpuls kann das Übertragungsverhalten und damit der zeitliche Verlauf des Pulses in der Referenzebene des Koaxialsteckers rekonstruiert werden (Bild 3).

Bildgebungsverfahren auf der Grundlage von THz-Signalen zeichnen sich gegenüber ähnlichen Verfahren mit Mikrowellen durch eine bessere Auflösung bei gleichzeitig deutlich geringerer Strahlenbelastung gegenüber Röntgenverfahren aus. In Zusammenarbeit mit der Arbeitsgruppe THz-Systemtechnik des Instituts für Hochfrequenztechnik der TU Braunschweig ist das weltweit erste funktionstüchtige Spektrometer auf der Grundlage kontinuierlicher THz-Strahlung entstanden, zu dem die Abteilung mit der Entwicklung der photoleitenden Antenne beigetragen hat, mit deren Hilfe das THz-Signal aus den zwei Moden einer abstimmbaren Laserdioden abgeleitet wird. Um die Leistungsfähigkeit des Verfahrens zu demonstrieren, wurden die Transmissionseigenschaften eines Schnittes durch eine karzinomatöse menschliche Leber ermittelt und mit einem mit herkömmlicher Technik ermittelten Schnittbild verglichen (Bild 4). Kontrast und Detaillierungsgrad lassen sich erhöhen, wenn die Frequenz des THz-Signals noch besser an die Probe angepasst und das Signal-Rausch-Verhältnis verbessert wird.

**E-Metrology**

Worte wie Internet, Multimedia und E-Business gehen uns schon wie selbstverständlich von den Lippen, und nach heutigen Voraussetzungen wird im Jahre 2010 die Hälfte der Menschheit – dann immerhin fünf Milliarden Menschen – direkten oder indirekten Zugang zum Internet haben. In Zusammenarbeit mit dem Projekt Q.105 *Internet-Anwendungen für die Metrologie* hat die Abteilung Einsatzmöglichkeiten des Internet für die Metrologie – Fernkalibrierung und Fernüberwachung – erprobt.

Im DKD werden mehr als 280 Laboratorien betreut, die im Abstand von zwölf bis 18 Monaten besucht werden müssen. Gelänge es, auch nur einen Teil dieser Besuche durch den Einsatz des Internet zu vermeiden, könnten beträchtliche Kosten eingespart werden. Erstmals angewendet wurde das Verfahren beim Standortwechsel eines in den USA akkreditierten Laboratoriums und auch bei einem akkreditierten Laboratorium in München, was dank einer im wahrsten Sinne des Wortes vorbildlichen Präsentation im Internet ohne den ansonsten erforderlichen Überwachungsbesuch vonstatten ging.

Am Rande der diesjährigen Sitzungen der DKD-Fachausschüsse *Gleichstrom und Niederfrequenz* sowie *Hochfrequenz und Optik* wurde die Fernkalibrierung eines Messgeräts mit einem Transfornormal demonstriert (Bild 5). Dazu wurde ein kommerzielles Audio/Video-System verwendet, wie es in vielen Firmen schon seit längerer Zeit routinemäßig eingesetzt wird. Das Messgerät wurde vor Ort mit dem Transfornormal verbunden und per Internet mit Hilfe eines „virtuellen Instruments“ angesteuert. Darunter versteht man Programme für die komplette Steuerung eines Messgerätes mit Hilfe eines Computers. Der gesamte Vorgang wurde mit dem Video/Audio-System überwacht. Erprobt wurde das System zusammen mit Siemens, Erlangen.

Deutlich höhere Anforderungen müssen gestellt werden, wenn es um den Austausch sensibler Messdaten geht, wie sie beispielsweise im gesetzlichen Messwesen anfallen. Zu diesem Thema ist im Rahmen von VERNET – einem Ideenwettbewerb des BMWi zur Unterstützung der deutschen Industrie bei der Einführung von Sicherheitstechnologien in offenen Kommunikationsnetzen –, angestoßen durch die Abteilung, ein Projektvorschlag SELMA „Sicherer elektronischer Messdatenaustausch“ eingereicht und bewilligt worden, der von einem Konsortium bestehend aus Energieversorgern, Herstellern, Bundes- und Länderbehörden (PTB, BSI, AGME) sowie zweier Universitäten (Münster und Siegen) bearbeitet wird. Das Projekt beschränkt sich vorerst auf Elektrizitäts- und Gaszähler, kann aber ganz allgemein als richtungweisend für die Übertragung eichpflichtiger Daten angesehen werden.

Voraussetzung dafür sind moderne, kommunikationsfähige Energiemessgeräte, wie sie in der Abteilung in zunehmendem Maße im Rahmen der gesetzlichen Bauartzulassungstätigkeit beurteilt werden. Das Projekt SELMA bestätigt, dass die bei der Bearbeitung von Zulassungen aufgebaute Kompetenz Impulse für zeitgemäße industrielle Entwicklungen geben kann. Auch dies zählt seit ihrer Gründung zu den Aufgaben der PTB/PTR und hat die Messgerätechnik nachhaltig beeinflusst. Was könnte bereiter Zeugnis darüber ablegen als das Zählermuseum – eine Sammlung von über 600 historischen Geräten (eines zeigt das Titelbild) –, das der PTB auf Initiative eines Mitarbeiters der Abteilung von den Stadtwerken München im Jahr 2001 als Schenkung übereignet worden ist.

**Internes/Sonstiges**

**Abschluss des Projekts „Messunsicherheit“**  
Mit der Umstrukturierung der Abteilung im Jahre 1997 wurde das Projekt 2.002 *Messunsicherheit im industriellen und gesetzlichen Messwesen* eingerichtet, das die Umsetzung des *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM)* in die Praxis zum Ziel hatte und jetzt abgeschlossen werden konnte (Bild 6).

Die Wirkung des Projekts reichte weit über den Rahmen der Abteilung und auch der PTB hinaus und hat wesentlich dazu beigetragen, das Gedankengut des GUM in der täglichen

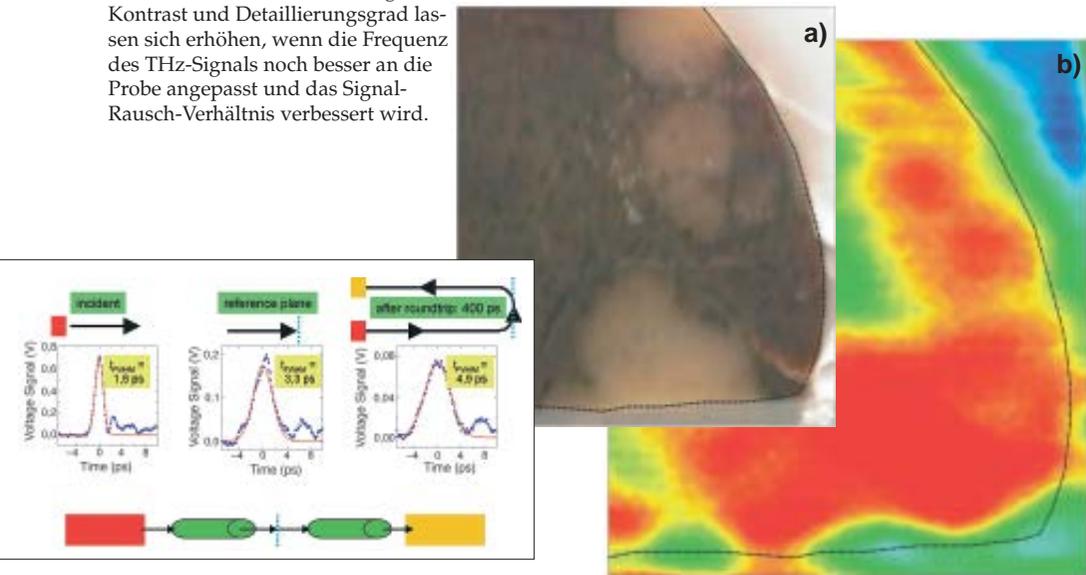


Bild 3: Zeitlicher Verlauf eines Pikosekunden-Spannungspulses am Ort der Entstehung, in der Referenzebene des Koaxialsteckers und nach Reflexion an einem Kurzschluss (von links)

Bild 4: Bilder von Gewebeproben einer karzinomatösen menschlichen Leber: a) optisches Bild, b) Bild mit kontinuierlicher THz-Strahlung

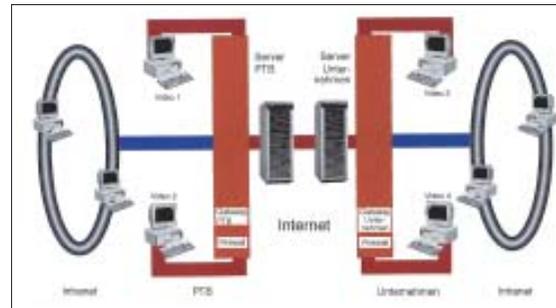


Bild 5: Austausch von Daten und Informationen via Internet zwischen der PTB und einem Kalibrierlaboratorium



Bild 6: Auch heute noch bildet die Gaußsche Fehlerfortpflanzung die Grundlage für die Berechnung der Messunsicherheit von Messergebnissen

Laborpraxis zu verankern. Lag der Schwerpunkt der Aktivitäten anfänglich bei der Umsetzung des PTB-Konzepts zur Messunsicherheit in der Abteilung, so verlagerte er sich während der Projektlaufzeit mehr und mehr in Richtung nationaler und internationaler Aktivitäten. Wichtige Meilensteine waren die Mitarbeit bei der Erarbeitung des EA Application Document EA-4/02 *Expression of the Uncertainty of Measurements in Calibration* und zweier dazugehöriger Ergänzungen mit praktischen Beispielen für Messunsicherheitsanalysen in den verschiedenen Fachgebieten sowie die Umsetzung dieser Dokumente im Deutschen Kalibrierdienst. Mittlerweile folgen alle 280 im DKD akkreditierten Kalibrierlaboratorien dieser Methode. Im Rahmen von zahlreichen Seminaren, Workshops, Kolloquien und Fachveröffentlichungen im In- und Ausland, teilweise zusammen mit dem DIN und anderen Veranstaltern, wurde das Konzept des GUM vorgestellt und seine Umsetzung in die tägliche Praxis erläutert.

#### **Selbstorganisierte Halbleiter-Nanostrukturen**

Selbstorganisierte Halbleiter-Nanostrukturen nehmen in der Forschung einen breiten Raum ein, da sie schon während des Wachstumsprozesses entstehen und versetzungsfrei in eine geeignete Halbleitermatrix eingebettet werden können. Dadurch ist keine aufwändige lithographische Bearbeitung der Kristalle mehr erforderlich und ein relativ einfacher Zugang zu Quantenpunkt-Strukturen mit Null-dimensionaler elektronischer Zustandsdichte möglich.

Ziel eines zu diesem Thema abgehaltenen PTB-Seminars war es, den gegenwärtigen Stand der Forschung auf dem Gebiet der selbstorganisierten Halbleiter-Nanostrukturen darzustellen. Ein besonderer Schwerpunkt war dem elektrischen Transport durch selbstorganisierte Indiumarsenid-Quantenpunkte gewidmet, die, in elektronische Bauelemente eingebettet, einen einfachen Zugang zur Untersuchung des Einzel-Elektronen-Tunnels ermöglichen. Im Verlauf des Seminars zeigte es sich, dass Halbleiterstrukturen mit selbstorganisierten Quantenpunkten durchaus das Potential für metrologische Anwendungen besitzen.

#### **Herbsttagung der URSI**

Auf der diesjährigen Herbsttagung der URSI-Deutschland in Kleinheubach hatte es die Abteilung übernommen, die beiden Sitzungen der Kommission *A Electromagnetic Metrology* inhaltlich zu gestalten. Eine der Sitzungen *Quantum Standards for Electric Units* war dem gegenwärtigen Stand der Präzisionsmesstechnik gewidmet und spannte einen Bogen von dem Zusammenspiel zwischen Einheiten und Fundamentalkonstanten über das metrologische Quanten-Dreieck bis hin zu ausgewählten Problemen bei Quantennormalen für Spannung, Stromstärke und Widerstand. Neben mehreren Beiträgen aus der Abteilung konnten hier auch Vortragende aus anderen europäischen Staatsinstituten gewonnen werden.

Die zweite Sitzung beinhaltete unter dem Thema *Electromagnetic Metrology* ausgewählte Beiträge aus der Hochfrequenz-Messtechnik, unter anderem Kalibrierverfahren für Netzwerkanalysatoren, Erzeugung von Pikosekunden-Spannungsimpulsen und Feldberechnungen. Auch hier war die Abteilung mit einem Beitrag vertreten.

## **In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung**

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

### **Grundlagen der Metrologie**

#### **Optimierte 1-V-SINIS-Josephson-Schaltungen für das Quantenvoltmeter**

Durch Optimierung der Verteilung der Mikrowellenleistung in einem 1-V-SINIS-Josephson-Array wird eine größere Einsatzbandbreite möglich. Gleichzeitig wird die Handhabung des Arrays vereinfacht.

#### **Josephson-Doppelpotentiometer zur präzisen Bestimmung von Widerstandsverhältnissen**

Mit Hilfe zweier schnell schaltbarer Josephson-Spannungsnormale können Widerstandsverhältnisse mit einer relativen Unsicherheit von  $2 \text{ n}\Omega/\Omega$  bestimmt werden.

#### **Intern geschuntete Josephsonkontakte für hochintegrierte supraleitende Schaltungsanwendungen**

Mit unterschiedlichen Technologien wurden ultraschnelle supraleitende Digitalschaltungen hergestellt. Die Bit-Fehlerrate dieser Schaltungen wurde gemessen.

#### **Einsatzspannung des Einzel-Elektronen-Tunnels durch selbstorganisierte Quantenpunkte gezielt einstellbar**

Durch eine Optimierung des MBE-Wachstumsprozesses können elektronische Eigenschaften selbstorganisierter Nanosysteme gezielt beeinflusst werden.

#### **Frequenzgekoppelter Transfer einzelner Cooper-Paare durch einen supraleitenden Einzel-Elektronen-Transistor mit dissipativer Umgebung**

Die frequenzgekoppelte Bewegung einzelner Cooper-Paare durch einen supraleitenden Einzel-Elektronen-Transistor aus Aluminium mit Chrom-Mikrowiderstand wurde demonstriert.

#### **Einzel-Elektronen-Transistor mit diffusivem elektronischen Transport durch Dünnschicht-Widerstände**

Es wurde eine perfekte, e-periodische Modulation der Coulomb-Blockade an einem Einzel-Elektronen-Transistor (SET) auf Aluminium-Basis beobachtet, bei dem Dünnschicht-Mikrostreifen aus Chrom die üblichen Tunnelbarrieren ersetzten.

#### **Genauere Stromstärken dank reinerer Akustik**

Die Flachheit von Stromplateaus beim akustisch getriebenen Einzel-Elektronentransport lässt sich durch Unterdrückung akustischer Echowellen verbessern.

#### **Wirbelströme in Quanten-Hall-Proben**

Mit Einzelelektronen-Transistoren, die als höchstempfindliche Potentialsonden genutzt werden, kann die Anregung von Magnetfeld-induzierten Wirbelströmen in Quanten-Hall-Proben beobachtet werden.

#### **Supraleitende Koplantarleitungen aus Niob im Submikrometerbereich**

Wenige hundert Nanometer große supraleitende Koplantarleitungen aus Niob wurden hergestellt und hinsichtlich ihrer Mikrowelleneigenschaften vermessen. Dies erlaubte erstmals einen Vergleich mit Simulationsrechnungen.

#### **Bildgebende Spektroskopie mit kontinuierlicher Terahertz-Strahlung**

In der Arbeitsgruppe *THz-Systemtechnik* des *Instituts für Hochfrequenztechnik* der TU Braunschweig wurde das weltweit erste funktionsfähige THz-Spektrometer auf Basis von kontinuierlicher THz-Strahlung entwickelt. Die dazu notwendigen Halbleiterstrukturen wurden in der PTB hergestellt.

#### **Metrologie für die Wirtschaft**

##### **Eine hochpräzise rückführbare Normalstromquelle für den Strombereich von 10 pA bis 0,1 fA**

Eine neuartige Stromquelle liefert eine über einen langen Zeitraum konstante kleine Stromstärke und erlaubt damit eine genauere Überprüfung und Kalibrierung von Pikoamperemetern.

##### **Bestimmung der Gleichstromleitfähigkeit von Metallen mit der van-der-Pauw-Methode**

Für die Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit von Metallen werden in einem EU-Projekt verschiedene Messmethoden untersucht. Mit einem Messplatz für die Bestimmung der Leitfähigkeit nach der van-der-

Pauw-Methode wurden von mehreren Partnern sehr gut übereinstimmende Ergebnisse erzielt.

### **Präzise Effektivwertbestimmung von niederfrequenten Wechselspannungen mittels Abtastverfahren**

Es wurde ein digitales Abtastverfahren für die präzise Effektivwertbestimmung von niederfrequenten Wechselspannungen im Frequenzbereich von 0 Hz bis 1 kHz entwickelt.

### **Gleichspannungsgekoppelter Verstärker für kleine Wechselspannungen**

Für den präzisen Transfer von kleinen Wechselspannungen im Frequenzbereich von 10 Hz bis 1 MHz auf äquivalente Gleichspannungen wurde ein an diese spezielle Messaufgabe angepasster Verstärker entwickelt.

### **Neue Anschlussmöglichkeiten für Hochfrequenz-Streuparametermessplätze in den Koaxialsystemen 3,5 mm, 2,92 mm und 2,4 mm**

Die Kalibriermöglichkeiten für koaxiale HF-Reflexionsnormale mit Hilfe der Doppelverhältnis-Korrekturmethode wurden auf die Koaxialsysteme 3,5 mm, 2,92 mm und 2,4 mm für Frequenzen bis 50 GHz erweitert.

### **Einfach und präzise: Neues TMSO-Kalibrierverfahren für vektorielle Hochfrequenz-Netzwerkanalysatoren**

Ein neues TMSO-Kalibrierverfahren für vektorielle Hochfrequenz-Netzwerkanalysatoren wurde entwickelt. Es ist einfacher und gleichzeitig präziser als das bisher übliche und in der Industrie genutzte Verfahren.

### **Messplatz zur Kalibrierung von Stoßstrommesseinrichtungen**

Als Vorbereitung für einen Ringvergleich von Hochstrom-Messanlagen wurde in der PTB ein Messplatz für Stoßstrom mit Stromstärken bis zu 20 kA aufgebaut und hinsichtlich seiner Messunsicherheit untersucht.

### **Programmierbarer Generator zur Nachbildung von Teilentladungsimpulsen**

Ein programmierbarer Kalibrator für Teilentladungsmessgeräte wurde erweitert und neuen Prüfanforderungen angepasst.

### **Verbesserung der Selektivität bei der Messung der Wellenform bei Magnetstreifen auf Identifikationskarten**

Durch ein neues Auswerteverfahren wurde die Diskriminierung zwischen „guten“ und „schlechten“ Magnetstreifen auf Identifikationskarten deutlich verbessert.

### **Metrologie für die Gesellschaft**

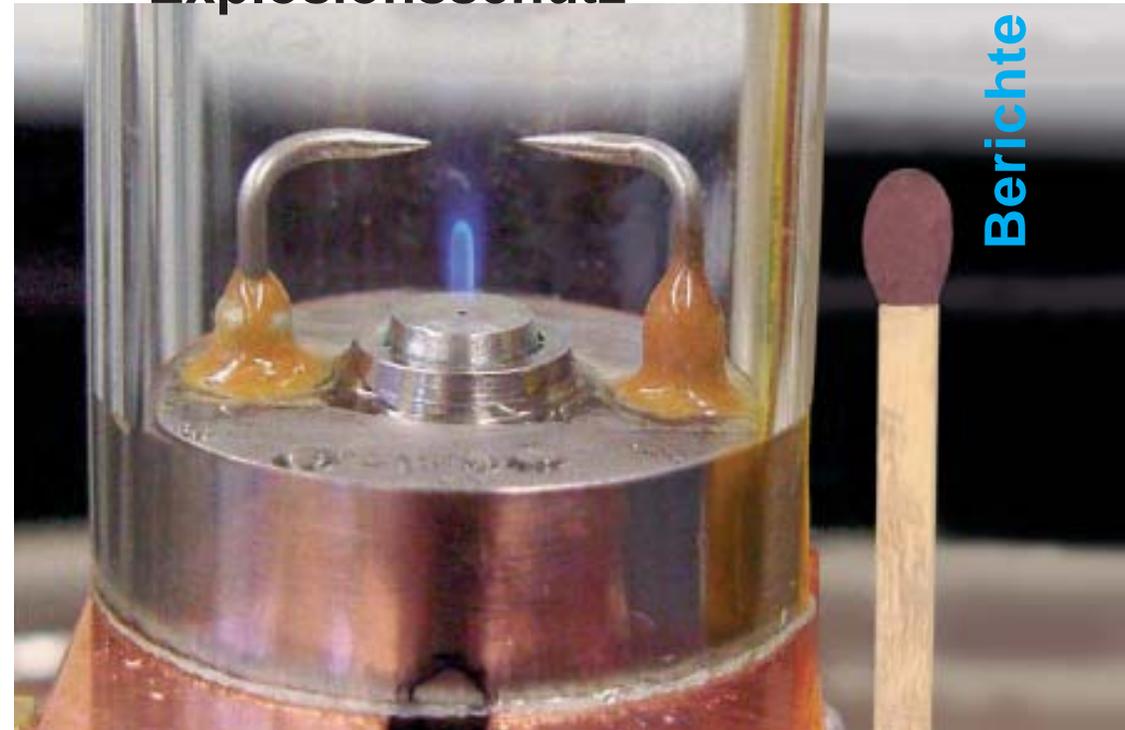
#### **Neues digitales Normal für die elektrische Wechselleistung im Einsatz**

Für den Einsatz in der PTB wurde ein neues, digitales Normal entwickelt und aufgebaut, das nach dem Prinzip der Messung der elektrischen Wechselleistung mittels Abtastverfahren arbeitet.

#### **Wechselseitige Beeinflussung der einzelnen Messkanäle in dreiphasigen Präzisions-Leistungsmessgeräten**

Die Beurteilung der Präzision von dreiphasigen Präzisions-Leistungsmessgeräten wird durch ein neues Messverfahren erleichtert.

## Thermodynamik und Explosionsschutz



# Thermodynamik und Explosionschutz

## Thermodynamische Größen

### Präzisionsmessungen für Industrie und Wissenschaft

Für industrielle Anwendungen – z. B. in der Verfahrenstechnik – sind zuverlässige und genaue Daten thermodynamischer Zustands- und Transportgrößen von grundlegender Bedeutung: Die genaue Kenntnis der Energiebilanz einer chemischen Reaktion ist Voraussetzung für den sicheren Betrieb von Reaktoren und für die effiziente Erzeugung der gewünschten Produkte, das Zustandsverhalten von Gasen ist für die wirtschaftliche Energienutzung beim Betrieb von Kühlanlagen, Turbinen oder beim Einsatz komprimierter Gase zur Energiespeicherung wichtig. Im privaten Bereich sind die Heizkosten für ein Wohnhaus von der Wärmeleitfähigkeit der verwendeten Bau- und Isolierstoffe abhängig, zur Berechnung der Energiekosten muss der Brennwert des Erdgases gemessen werden.

Die Anforderungen an die Messunsicherheit und die Grenzen des messtechnisch Möglichen liegen je nach Messgröße in ganz unterschiedlicher Größenordnung. Während bei der Druckmessung im Bereich des Atmosphärendrucks eine relative Unsicherheit von  $1 \cdot 10^{-5}$  messtechnisch bedeutsam ist, z. B. im Hinblick auf den Anschluss von Bezugsnormen für die Kalibrierung von Höhennessern für Flugzeuge, ist die Messung der Wärmeleitfähigkeit von Dämmstoffen mit einer Unsicherheit von 1 % kaum realisierbar.

**Titelbild**  
Mikrobrenner eines neuartigen isothermen Gas-  
kalorimeters mit elektrischer Kompensation der  
Verbrennungsenergie

### Stoffeigenschaften als metrologische Bezugsgrößen – Messen an der Grenze des Möglichen

Präzisionsmessungen von Stoffeigenschaften durch direkte Rückführung auf die SI-Basis-einheiten sind mit sehr großem Aufwand verbunden. In der Metrologie werden daher soweit wie möglich die Eigenschaften reiner Stoffe, insbesondere solcher, die leicht in hochreiner Form erhältlich sind, als Bezugsgrößen verwendet.

Wasser dient als Basis für Viskositätsmessungen und wird als Dichtereferenz verwendet. Es kann in Verbindung mit einer Wägung als Volumennormal eingesetzt werden. Die bis heute verwendete Wasserdichtetabelle basiert auf Messungen, die vor 100 Jahren durchgeführt wurden und deren relative Unsicherheit erheblich größer ist als der heute angestrebte Wert von  $1 \cdot 10^{-6}$ . Um diesen zu erreichen, wurde – als Modifikation des hydrostatischen Wägeprinzips – eine magnetische Flotationsapparatur aufgebaut. Dabei wird der Schwebezustand eines Festkörpers in einer Flüssigkeit über einen mit dem Festkörper verbundenen magnetischen Senkkörper mit einem externen Magnetfeld eingestellt. Bei bekannter Festkörperdichte kann die Flüssigkeitsdichte bestimmt werden und umgekehrt. Das angestrebte Unsicherheitsziel kann nur erreicht werden, wenn alle Mess- und Einflussgrößen mit kleinstmöglicher relativer Messunsicherheit bestimmt werden (z. B. mit  $1 \cdot 10^{-7}$  bis  $3 \cdot 10^{-7}$  für Masse und Volumen des Festkörpers).

Auch die Unsicherheit von 0,17 % für die Viskosität von Wasser bei 20 °C entspricht nicht mehr den heutigen Anforderungen. Die Diskussion in einer ad-hoc-Arbeitsgruppe des BIPM hierzu ergab, dass mittelfristig an keinem metrologischen Staatsinstitut Ressourcen zur Verfügung stehen, um die sehr aufwän-

dige Neubestimmung der Wasserviskosität vorzunehmen. Da die für die Praxis relevanten Viskositätswerte meist um mehrere Größenordnungen über der Wasserviskosität liegen, haben mehrere Staatsinstitute zur zusätzlichen Absicherung der Viskositätskala mit dem Aufbau von Absolutviskosimetern für höhere Viskositäten begonnen. In der PTB wurde mit einer ersten Version eines Rotationsviskosimeters eine Messunsicherheit von 0,28 % erreicht. Von einer geplanten, verbesserten Version des Gerätes wird eine Messunsicherheit von  $\leq 0,1$  % erwartet.

Die Dichte von Quecksilber hat für die Metrologie einen hohen Stellenwert, insbesondere für die Druckmessung. Die genauesten Werte der Quecksilberdichte beruhen auf Messungen, die teilweise 30 Jahre zurückliegen und relative Streubreiten von mehr als  $3 \cdot 10^{-6}$  aufweisen, während heute für metrologische Anwendungen eine relative Unsicherheit von  $5 \cdot 10^{-7}$  angestrebt wird. Um dies zu erreichen, wurde ein weiterer Messplatz nach dem Prinzip der hydrostatischen Wägung aufgebaut. Als Dichtenormal dient dabei ein Hohlwürfel aus Tantal (Kantenlänge ca. 8 cm), dessen Volumen durch direkte optische Vermessung in einem speziellen Planflächen-Fizeau-Interferometer (Abteilung 5 der PTB) bestimmt wird. Damit dies möglich ist, dürfen die Abweichungen von der idealen Geometrie maximal 0,5 µm betragen. Das Arbeitsprogramm beinhaltet Messungen der Quecksilberdichte im Rahmen eines internationalen Schlüsselvergleichs (CCM) von Quecksilbermanometern, die als Primärnormale eingesetzt sind, sowie Messungen für ein in der PTB neu entwickeltes interferometrisches Quecksilber-Mikromanometer. Dieses Normalgerät für kleine Drücke soll auch zu einer Verringerung der Messunsicherheit des statischen Expansionsverfahrens zur Kalibrierung von Vakuummessgeräten beitra-

gen. Die genaue Kenntnis der Quecksilberdichte wird überdies für ein von der Universität Zürich durchgeführtes Experiment zur Neubestimmung der Gravitationskonstanten benötigt. Dabei wird die Gravitationskraft zweier Behälter mit je 500 l Quecksilber auf zwei 1 kg schwere Testmassen gemessen.

Bei den Arbeiten zur Neudefinition des Kilogramms spielt die Dichte von Silizium-Einkristallen eine zentrale Rolle. Für die Messung der Dichteunterschiede von Siliziumproben, die Rückschlüsse auf Störungen und Inhomogenitäten der Kristalle ermöglichen, werden relative Messunsicherheiten von  $10^{-8}$  angestrebt. Die hierfür eingesetzte Druckflotationsapparatur wurde verbessert und die Messunsicherheit um den Faktor 5 auf  $2 \cdot 10^{-8}$  gesenkt.

Der Brennwert von Methan ist weltweit die Referenz für die Brennwertbestimmung von Gasen. Die in der Norm ISO 6976 festgelegten Brennwerte für die Hauptkomponenten von Erdgas basieren auf Messungen, die mehr als 50 Jahre zurück liegen und für die aus heutiger Sicht relative Messunsicherheiten von jeweils  $\geq 0,12$  % angenommen werden müssen. Gegenwärtig gibt es nur wenige Institute, die absolute Brennwertbestimmungen mit einer Unsicherheit von  $\leq 0,2$  % durchführen können. Wegen der großen wirtschaftlichen Bedeutung von Erdgas als Energieträger wird von der Gasindustrie eine Messunsicherheit von 0,05 % gewünscht. Insbesondere besteht Bedarf an genaueren Werten für die Brennwerte der einzelnen Erdgaskomponenten. In einer überwiegend von der PTB durchgeführten Machbarkeitsstudie, die von mehreren europäischen Gasversorgern gefördert wurde, konnte die Realisierbarkeit dieses Ziels gezeigt werden. Ein von der europäischen Gasindustrie und dem französischen Staatsinstitut (LNE) gefördertes Projekt zur

Entwicklung eines adiabatischen Referenzkalorimeters, mit dem die genannte Messunsicherheit erreicht werden soll, ist angelaufen.

### Maßverkörperung durch Referenzproben – ein unverzichtbares Hilfsmittel zur Rückführung von Messungen

Nur wenige Stoffe wie Wasser oder Methan sind ohne extremen Aufwand für Reinigung oder Analyse in ausreichender Reinheit verfügbar, so dass die bekannten Stoffdaten mit kleiner Unsicherheit als gültig übernommen werden können.

In den meisten Fällen sind jedoch die gemessenen Werte nur für die jeweils untersuchte Charge eines homogenen Materials repräsentativ oder gelten nur für die gemessene Probe, so dass individuelle Kalibrierungen erforderlich sind, damit die für Kunden vermessenen Proben zur Gerätekalibrierung oder -überprüfung eingesetzt werden können.

Dynamische Differenzkalorimeter (DSC) benötigen Kalibriermaterialien für die Messung von Temperatur, Wärme und Wärmekapazität. Seit kurzem werden von der PTB vier Metalle (Gallium, Indium, Zinn, Bismut) als Referenzmaterialien mit zertifizierten Werten für Schmelztemperatur und Schmelzwärme bereitgestellt. Um künftig auch Referenzmaterialien für höhere Temperaturen und mit kleinerer Unsicherheit ( $\leq 0,1\%$ ) zertifizieren zu können, wurde ein adiabatisches Präzisionskalorimeter aufgebaut (Bild 1).

Für die Wärmeleitmessung an Feststoffen ist zur Anwendung bei hohen Temperaturen ein glaskeramisches Material zertifiziert worden (EU-Projekt). Dieses Referenzmaterial wird über das europäische Institut für Referenzmaterialien und -messungen (IRMM) bereitgestellt. Gefördert durch das Deutsche Institut für Bautechnik (DIBt), wird an der Qualifizierung und Bereitstellung eines Referenzmaterials mit einer für Bauprodukte typischen Wärmeleitfähigkeit gearbeitet.

Bei der Herstellung und Verarbeitung von Glas ist das Viskositäts-Temperaturverhalten des Glases entscheidend. Als neue Referenzmaterialien stehen drei Gläser mit zertifizierter Temperaturabhängigkeit der Viskosität zur Verfügung (Bild 2).

Vorwiegend für die Verwendung in Kalibrierlaboratorien und Metrologie-Instituten wurde eine Serie von Siliziumkugeln (Bild 3) und Quarzglas-Senkörpern als Volumennormale höchster Genauigkeit hergestellt und kalibriert.

Die Abgabe von Referenzflüssigkeiten für Viskositäts- und Dichtemessung wird in zunehmendem Maße von Laboratorien des DKD übernommen.

### Internationale Angelegenheiten

Die Arbeiten konzentrieren sich hier auf die Umsetzung der im Abkommen zur gegenseitigen Anerkennung nationaler Normale und von nationalen Metrologieinstituten ausgestellten Kalibrierzertifikaten (MRA) getroffenen Festlegungen, wobei die Durchführung von Schlüsselvergleichen sowohl auf BIPM-Ebene als auch in EUROMET den größten Umfang haben. Die Teilnahme an Vergleichsmessungen anderer Regionen (Amerika (SIM), Asien (APMP)) dient der Verknüpfung mit EUROMET- oder BIPM-Schlüsselvergleichen. Während für die Druckmessung die Abstimmung über die Messmöglichkeiten der einzelnen Staatsinstitute weitgehend abgeschlossen ist, müssen bei thermophysikalischen Größen noch grundlegende Fragen geklärt werden.

Die Beratungstätigkeit für ausländische Metrologieinstitute verlagert sich zunehmend auf die Vorbereitung von DKD-Akkreditierungen. Von fünf für Dichtemessung akkreditierten Laboratorien befinden sich zwei im Ausland, eine Akkreditierung in Südamerika ist in Vorbereitung. Im Bereich Druckmessung werden Neuakkreditierungen überwiegend für ausländische Laboratorien vorgenommen.

Ein von der PTB koordiniertes EUROMET-Projekt befasst sich mit der Entwicklung von Verfahren zur genauen Ermittlung der elastischen Deformation von Kolben-Zylinder-Systemen für Hochdruckmessungen. Diese Größe ist entscheidend für die erreichbare Messunsicherheit.

Experimentelle Forschung im Bereich thermodynamischer Gleichgewichts- und Transportgrößen wird weltweit nur noch in wenigen Instituten betrieben, da bei ständig wach-

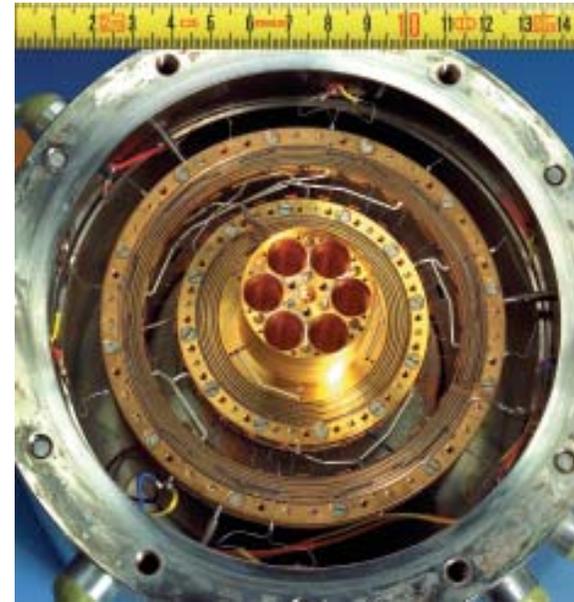


Bild 1: Messkammer mit Probenaufnahme eines adiabatischen Präzisionskalorimeters zur Messung von Wärmekapazitäten und Umwandlungswärmen

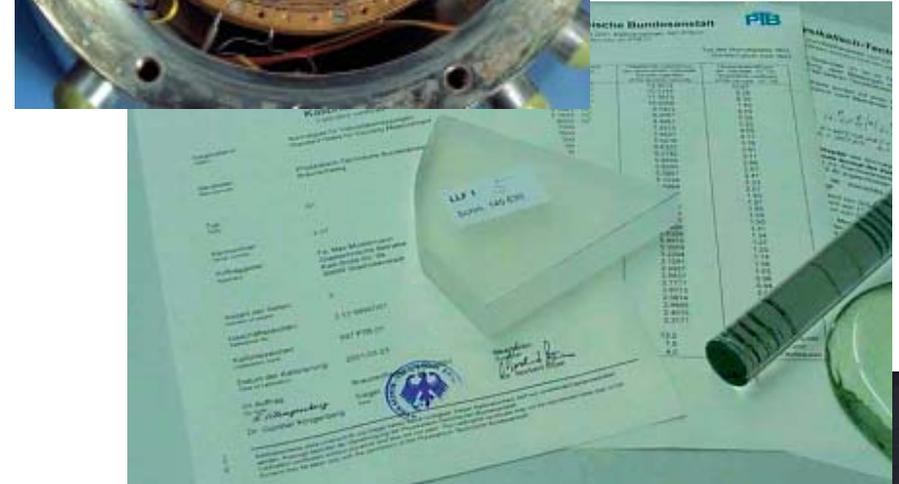


Bild 2: Referenzproben für die Viskositätsmessung von Gläsern



Bild 3: Siliziumkugeln als Normale zur Volumenmessung

senden Rechnerkapazitäten zunehmend Simulationsrechnungen zur Ermittlung von Stoffdaten eingesetzt werden. Da jedoch die Zuverlässigkeit von Simulationsrechnungen nicht immer „garantiert“ ist, wird verstärkt auf die Bedeutung abgesicherter thermodynamischer Referenzdaten hingewiesen. Experimentelle Arbeiten auf diesem Gebiet können heute nur im internationalen Verbund erfolgreich durchgeführt werden. Ein EUROMET-Projekt zum Vergleich der Verfahren für Dichtemessung in einem größeren Temperatur- und Druckbereich (Teilnehmer NEL (GB), NIST (USA), NMJ (Japan), PTB) ist ein Beitrag zu dieser Kooperation.

### Anwendungsorientierte Forschung

Für viele Industrieprodukte, wie z. B. geschäumte Wärmedämmstoffe, ist die Wärmeleitfähigkeit der enthaltenen Gase wichtig. Für zahlreiche Gase fehlen zuverlässige Wärmeleitfähigkeitswerte unter praxisrelevanten Zustandsbedingungen. In einem industriegeförderten Projekt wurden die Wärmeleitfähigkeiten von Reingasen wie Cyclopropan, Schwefelhexafluorid und anderen bestimmt. Für weitere Untersuchungen wird ein neu entwickeltes Messgerät, das auf dem Prinzip der transienten Messung mit zwei Heizdrähten basiert, eingesetzt. Mit diesem Gerät sind höhere Temperaturen und Drücke (verglichen mit stationär arbeitenden Geräten) zugänglich bei gleichzeitig deutlicher Verringerung der Messunsicherheit. Damit können auch bisher unerklärte Messabweichungen bei der Messung polarer Fluide sowie das Verhalten von Gasen unter geringem Druck beim Wärmetransport systematisch untersucht werden.

In einem von der EU geförderten Projekt wird die Wärmeleitung in kohlefaserverstärkten Verbundwerkstoffen für die Luft- und Raumfahrt, speziell im Hinblick auf die Beeinflussung durch Wasseraufnahme, untersucht. Ein weiteres Forschungsthema betraf die Wärmeleitfähigkeit feuchter Baustoffe.

### Unterstützung für die Praxis: Normen, Workshops, Ringvergleiche

Wenngleich der „Leitfaden zur Unsicherheitsberechnung“ (GUM) weltweit akzeptiert und angewandt wird, unterbleibt in der Praxis oft

die Angabe einer Messunsicherheit, da eine einfache und dem jeweiligen Messgerät oder Messverfahren angepasste Umsetzung des Leitfadens in Form messtechnischer Empfehlungen, Richtlinien oder Normen fehlt.

Für die wesentlichen Prinzipien zur Viskositätsmessung wurden drei DIN-Normen zur Kalibrierung und Unsicherheitsermittlung erarbeitet. Diese Normen dienen als Basis für die Ausarbeitung einer ISO-Normenreihe zur stoffgruppenunabhängigen Normung von Viskositätsmessverfahren.

Entsprechende Arbeiten an internationalen Normen, Richtlinien und Empfehlungen zur Druckmessung, Dichtemessung und zur Kalibrierung von dynamischen Differenzkalorimetern wurden jeweils durch Workshops ergänzt. Moderne Messgeräte werden überwiegend rechnergesteuert betrieben, insbesondere wenn eine größere Anzahl von Mess- und Einflussgrößen berücksichtigt werden muss (z. B. bei DSC-Geräten und Rotationsviskosimetern). Eine Umsetzung des Leitfadens in die Praxis ist erst dann realistisch, wenn auch die Unsicherheitsberechnung Bestandteil der Software ist. In einem PTB-Workshop zur Rotationsviskosimetrie (Bild 4) war daher die Bereitstellung und Erläuterung eines speziell für diese Geräte entwickelten Programms zur Unsicherheitsermittlung ein zentrales Thema.

Trotz sorgfältiger Anwendung von Normen und trotz Einsatz von Referenzmaterialien ist der Praxistest über Ringvergleiche ein unverzichtbarer Bestandteil der Qualitätssicherung. Aktuelle Schwerpunkte waren dabei der Vergleich von Betriebsdichteaufnehmern für Erdgas, Aräometerkalibrierungen, Messung kleiner Volumina sowie der Messung thermophysikalischer Eigenschaften an Stahl.

### Vom Messprinzip zum marktfähigen Gerät

Brennwertmessgeräte für Gas dienen in der Regel der Energieabrechnung und unterliegen für diese Anwendung in Deutschland der Eichpflicht. Die derzeit auf dem Markt befindlichen, zugelassenen Gaskalorimeter sind messtechnisch veraltet und bieten keine Alternative zu modernen Gaschromatographen. Da in Gasmessstationen, bedingt

durch die Liberalisierung des Gasmarktes, zunehmend stark wechselnde Gasbeschafflichkeiten gemessen werden müssen, besteht sowohl bei der Gasversorgungsindustrie als auch den Eichbehörden Bedarf für moderne Gaskalorimeter, da die eingesetzten Gaschromatographen eine größere Anzahl von Kalibriergasen zum zuverlässigen Betrieb benötigen. Dies kann besonders bei einer für die Zukunft erwarteten Einspeisung von Biogasen oder Deponiegasen in Versorgungsnetze zu Problemen führen.

Ein in Zusammenarbeit mit dem russischen Staatsinstitut (VNIIM, St. Petersburg) entwickeltes neuartiges isothermes Kalorimeter mit elektrischer Kompensation der Verbrennungsenergie (s. Titelbild) bietet das Potential für ein Seriengerät, das eine Messunsicherheit von 0,2 % ermöglicht. Eine Unsicherheitsanalyse sowie erste Ergebnisse an einem Prototyp haben gezeigt, dass mit diesem Messprinzip bei entsprechendem messtechnischen Aufwand noch kleinere Unsicherheiten erreicht werden können. In Zusammenarbeit mit einem mittelständischen Unternehmen ist der Bau eines marktfähigen Gerätes in Vorbereitung.



Bild 4: Demonstration der Drehmomentkalibrierung für ein Rotationsviskosimeter während eines PTB-Workshops

Bild 5: Versuchsaufbau zur Messung der Wärmeleitfähigkeit von Ziegelsteinen mit dem instationären Heizstreifenverfahren

## In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

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

### Grundlagen der Metrologie

#### Quecksilberdichte für die Bestimmung der Gravitationskonstante

Für die Bestimmung der Gravitationskonstante mit Hilfe von 13,5 t Quecksilber in der Universität Zürich wurden die Dichten von drei Quecksilberproben mit einer Unsicherheit (Erweiterungsfaktor  $k = 2$ ) von  $0,10 \text{ kg/m}^3$  gemessen.

#### Unsicherheitsbetrachtung für ein isothermes Präzisionskalorimeter zur Brennwertbestimmung von Gasen

Eine Unsicherheitsbetrachtung für ein isothermes Kalorimeter für die Brennwertbestimmung von Gasen ergibt für den Brennwert von Methan die erweiterte ( $k = 2$ ) relative Messunsicherheit  $0,04 \%$ ; als wesentliche Komponente der Messunsicherheit wurde die Gasmengenbestimmung identifiziert, während die Wärmemengenbestimmung nur einen geringen Beitrag lieferte.

#### Klinische Chemie: Elektrolyte in Humanserum

Eine Halbierung der Messunsicherheit bei der Elektrolytbestimmung in Humanserum wurde durch den Einsatz moderner Analysenmesstechnik (Thermionen-/ICP-Sektorfeldmassenspektrometer) erreicht.

#### Neues Verfahren zur Creatininbestimmung in Humanserum

Die Kapillarelektrophorese-Massenspektrometrie (CE/MS) wurde als Alternative zur Gaschromatographie-Massenspektrometrie (GC/MS) für die Stoffmengenbestimmung von Creatinin in Serum eingeführt; Vorteil: Reduzierung des Zeitbedarfs für die Probenvorbereitung.

### Metrologie für die Wirtschaft

#### Genauere Dichte von Dichte-Referenzflüssigkeiten

Die hydrostatische Messapparatur, die für die Kalibrierung von Dichte-Referenzflüssigkeiten benutzt wird, wurde verbessert und ermöglicht jetzt eine Bestimmung von Flüssigkeitsdichten mit Unsicherheiten (Erweiterungsfaktor  $k = 2$ ) von  $0,005 \text{ kg/m}^3$ .

#### Viskositätsmessungen an Glasschmelzen – Zertifizierung von Referenzmaterialien

Ein Kalk-Soda-Glas, ein Bleiglas und ein Hartglas wurden in weiten Viskositäts-Temperaturbereichen untersucht und werden nun als Referenzmaterialien von der PTB angeboten.

#### Wärmeleitfähigkeit von Gasen als Treibmittel für Polystyrol- und Polyurethan-Hartschäume

In Zusammenarbeit mit einem Industriepartner wurden von der PTB Referenzdatensätze zur Wärmeleitfähigkeit neuer Treibmittel für Wärmedämmstoffe erstellt.

#### Wärmeleitfähigkeit: THS-Verfahren zur Untersuchung feuchtebeladener CFK

Im Rahmen des EU-Projekts HYGROTHERM wurde das Transient-Hot-Strip-(THS)-Verfahren zur Messung der Wärmeleitfähigkeit feuchtebeladener kohlenstofffaserverstärkter Verbundwerkstoffe (CFK) qualifiziert.

#### Zündtemperatur bei erhöhtem Ausgangsdruck

Die Druckabhängigkeit der Zündtemperatur wurde systematisch für 20 Substanzen (aliphatische Alkohole und Ester sowie Aromaten) untersucht.

#### Update der Datenbank: CHEMSAFE enthält über 3000 Substanzen

Im Update 2001 der Datenbank CHEMSAFE wurden 62 brennbare, reine Flüssigkeiten sowie 16 Gemische neu aufgenommen. Die Gemischdaten sind Ergebnisse systematischer Untersuchungen zur Zündtemperatur.

#### Messung der Zündwirksamkeit von elektrostatisch erzeugten Entladungen ohne Verwendung brennbarer Gemische

Es wurde eine Prüfmethode entwickelt, bei der eine Bewertung der Zündgefahr, z. B. von Handsprühgeräten, durch eine rein elektrische Messung ohne Verwendung brennbarer Testgase möglich ist.

#### Explosionsgeschützter „i“-Feldbus hoher Leistung (ES-BUS)

Mit dem neuen ES-Bus-System (BMBF-Projekt) werden für die industrielle Praxis wichtige Anforderungen erfüllt (z. B. eigensicher verfügbare Leistung mindestens  $5 \text{ W}$  (Leitungslänge  $400 \text{ m}$ ), Datenübertragungsrate:  $1,5 \text{ MBit/s}$ ).

### Metrologie für die Gesellschaft

#### Vergleich von Kalibrierergebnissen für Betriebsdichteaufnehmer bei Kalibrierung mit Methan und Stickstoff im Bereich zwischen $30 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ und $90 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

Kalibrierte Betriebsdichteaufnehmer werden als Messmittel bei der Verteilung von Erdgas eingesetzt. Dichtemessungen mit den in verschiedenen Laboratorien kalibrierten Aufnehmern wichen maximal um  $0,04 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  von den Referenzwerten der PTB ab.

#### Referenzfähiger Messplatz für Zündschlagversuche an explosionsgeschützten elektrischen Betriebsmitteln

Die Entwicklung eines referenzfähigen Messplatzes für Ringvergleiche an druckfest gekapselten explosionsgeschützten elektrischen Betriebsmitteln wurde abgeschlossen und ein gleichartiger Messplatz an das rumänische Prüfinstitut geliefert.

#### Versuchsaufbau zur Ermittlung der Verluste und Erwärmungen umrichter gespeister Maschinen

In Zusammenarbeit mit einem Antriebssystemhersteller wurde ein Versuchsaufbau zur messtechnischen Ermittlung der Verluste umrichter gespeister Asynchronmaschinen unter verschiedenen Betriebsparametern erstellt und in Betrieb genommen (Messgrößen: aufgenommene elektrische und abgegebene mechanische Leistung, Temperaturen in Stator und Rotor).

### Internationale Angelegenheiten

#### Erster Schlüsselvergleich für die Messgröße Viskosität: EUROMET.M.V-K3

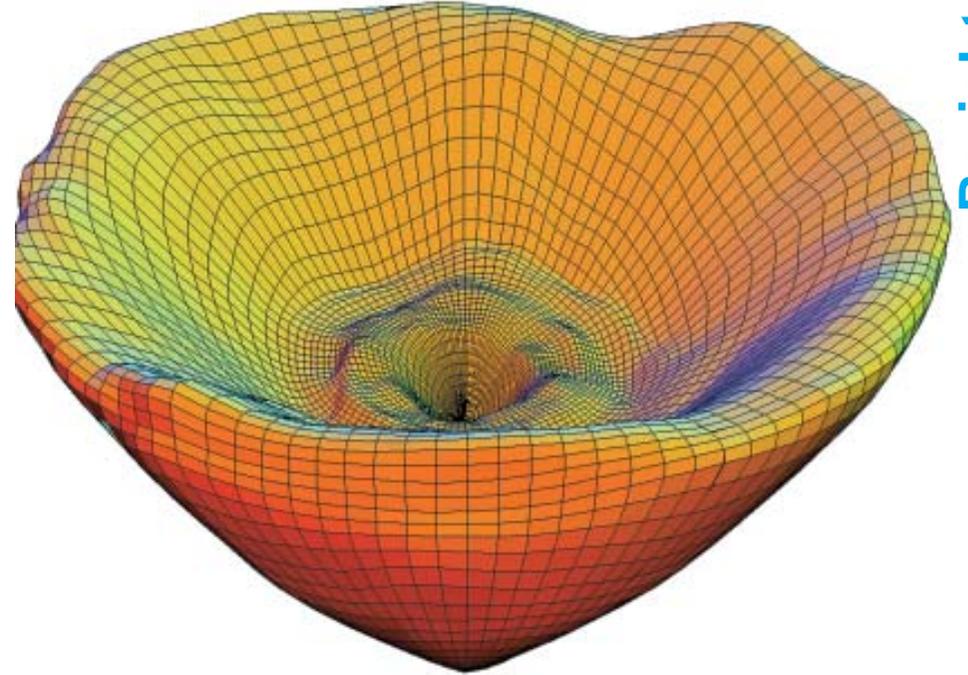
Bei den Vergleichsmessungen von sechs Nationalen Metrologie-Instituten (NMI) konnten die Referenzwerte eines Öls mittlerer Zähigkeit mit einer relativen Unsicherheit ( $k = 2$ ) von  $0,28 \%$  bestimmt werden, während sich bei einem extrem zähen Öl  $0,58 \%$  ergab.

#### EUROMET-Projekt 463: Berechnung der elastischen Verformung und der dazugehörigen Unsicherheit von Kolbenzylindern für Drücke bis $1 \text{ GPa}$

Der Druckverformungskoeffizient des PTB-1-GPa-Primärnormals wurde mit Hilfe der Methode der Finiten Elemente berechnet, ausgehend von den elastischen Werkstoffeigenschaften und der Spaltgeometrie des Kolbenzylindersystems, unter Berücksichtigung der Flüssigkeitseigenschaften des Druckübertragungsmediums und der bekannten Randbedingungen.

---

Optik



Berichte der Abteilungen

# Optik

Die Abteilung *Optik* der PTB bearbeitet in drei Fachbereichen die Gebiete *Licht und Strahlung*, *Bild- und Wellenoptik* und *Länge und Zeit*.

Im Fachbereich *Licht und Strahlung* werden verschiedene untereinander verknüpfte radiometrische und photometrische Einheiten im optischen Spektralbereich realisiert und weitergegeben. Die Abteilung *Optik* teilt sich diese Aufgabe mit der Abteilung *Temperatur und Synchrotronstrahlung*, wobei sich die Abteilung *Optik* im Wesentlichen auf den sichtbaren und die unmittelbar angrenzenden Spektralbereiche beschränkt. Als weitere Schwerpunkte werden im Fachbereich die Metrologie für die optische Nachrichtenübertragung, die Laserradiometrie und die Photovoltaik bearbeitet.

Im Fachbereich *Bild- und Wellenoptik* werden Messmethoden für unterschiedliche Bereiche der Optik entwickelt und angewandt. Gegenwärtige Schwerpunkte betreffen die quantitative Mikroskopie, die Bildgebung in der Medizin, die ultrapräzise Formmessung unterschiedlicher optischer Formflächen, die Messung von Eigenschaften optischer Komponenten und Materialien wie Transmissions- und Reflexionsgrad sowie die Femtosekunden-Messtechnik. Daneben werden in hohem Umfang Prüfungen und Zertifizierungen auf dem Gebiet des Augenschutzes durchgeführt.

Die Aufgaben des Fachbereichs *Länge und Zeit* orientieren sich an der Realisierung und Weitergabe der Einheiten von Länge (Meter) und Zeit (Sekunde) sowie an der Verbreitung der gesetzlichen Zeit in der Bundesrepublik Deutschland. Dazu gehört die Entwicklung und Bereitstellung von Laserwellenlängennormalen, die als die genauesten Längen-

**Titelbild**  
Gemessene räumliche Verteilung der Lichtstärke einer Leuchtdiode hoher Effizienz, die für die Verwendung in zukünftigen Beleuchtungsanlagen entwickelt wurde

normale für die Interferometrie und für die Kalibrierung technischer Längennormale zur Verfügung stehen. Für die Realisierung und Weitergabe der Zeiteinheit werden Atomuhren als primäre Normale für Zeit und Frequenz entwickelt und betrieben. Die Weitergabe der gesetzlichen Zeit an die Industrie, Wirtschaft und Forschung erfolgt über Satelliten, den Langwellensender DCF77 und einen Telefon- und Internetdienst. Forschungs- und Entwicklungsarbeiten auf den Gebieten der nichtlinearen Optik, der Laserspektrometrie und der Atominterferometrie sollen die Zukunft sichern.

Im vergangenen Jahr sind die im Folgenden näher beschriebenen Fortschritte erzielt worden.

## Radiometrie und Photometrie

Die PTB verstärkt gegenwärtig ihre Aktivitäten auf dem Gebiet der Photometrie und der dazu erforderlichen Radiometrie. Neben den Arbeiten, die zu einer verbesserten Darstellung der Candela, einer der sieben Basiseinheiten des internationalen Einheitensystems, führen werden, wird insbesondere die Messtechnik für die in der Entwicklung befindlichen neuartigen Lichtquellen wie Leuchtdiodencluster oder quecksilberfreie Lampen ausgebaut. Da diese Arbeitsbereiche einen Schwerpunkt im Neubau der Abteilung *Optik* bilden werden, wurden im vergangenen Jahr die apparativen Voraussetzungen für einen Einstieg in die Displaymesstechnik geschaffen sowie die Entwicklung eines konzeptionell neuartigen Goniophotometers begonnen. Die ständige Weiterentwicklung von Displays und flächenhaften Strahlern erfordert zukünftig verstärkt die quantitative Charakterisierung ihrer photometrischen und colorimetrischen Eigenschaften sowie die Entwicklung von neuartigen Transferrnormalen.

Die äußerst unterschiedlichen Anwendungsbereiche von Lasern z. B. in der medizinischen Diagnostik und Therapie, in der optischen Telekommunikation oder in der Materialbearbeitung benötigen genaue Messungen der optischen Leistung. Für die am meisten benutzten Laser im Bereich vom ultravioletten bis in den infraroten Spektralbereich hat die PTB Kalibriereinrichtungen aufgebaut, mit der die Leistungsmessgeräte abhängig von der Wellenlänge mit einer relativen Unsicherheit bis herab zu 0,2 % kalibriert werden können. Für den in der Materialbearbeitung wichtigen CO<sub>2</sub>-Laser stehen Detektoren für Leistungen bis über 1 kW zur Verfügung (Bild 1).

## Ultrapräzise Messung der Form optischer Flächen

Die Optik wird oft als Schlüsseltechnologie für andere Hochtechnologiegebiete bezeichnet. Dies gilt exemplarisch auch für die angestrebte zukünftige Lithographie mit Wellenlängen im extremen ultravioletten Spektralbereich. Die messtechnischen Erfordernisse an die hochgenaue Formmessung mit Subnanometergenauigkeiten stellen gegenwärtig bisher nicht bewältigte Herausforderungen an die optische Messtechnik. Zur Lösung dieser Probleme werden in der PTB insbesondere neuartige Messmethoden untersucht und hochgenaue rückführbare Formmessapparaturen auf der Basis dieser Methoden realisiert.

Für die ultra-präzise Vermessung der lokalen Flächenneigung (Slope) und Topographie von nahezu planen und schwach gekrümmten Flächen mit Genauigkeiten im Sub-Nanometer-Bereich wurde eine neue Apparatur aufgebaut. Das Messprinzip basiert auf Differenzmessungen von Reflexionswinkeln an der Prüflingsoberfläche mit großem lateralen Versatz (Shear) der Messorte, wobei die Topographie durch eine hochgenaue Integrationsprozedur aus den lokalen Flächenneigungen gewonnen wird. Ein besonderer Vorteil des Verfahrens liegt darin, dass keine Referenznormale benötigt werden und die Topographiemessung direkt auf die SI-Einheiten der Länge und des Winkels zurückgeführt werden kann (Bild 2, umseitig).

## Untersuchung bildaufzeichnender und bildwiedergebender Systeme

Für die Bildgebung in der medizinischen Radiologie werden auch heute noch vorwiegend Film-Folien-Systeme eingesetzt. Für die Sicherung der Bildqualität und die Minimierung der Dosis für die Röntgenaufnahmen ist die Kontrolle der Filmverarbeitung unerlässlich. Diese Kontrolle erfolgt über die Belichtung von Testfilmen in Lichtsensitometern. Die wesentlichen Kenngrößen derartiger Lichtsensitometer werden in der PTB gemessen; die Kalibrierungen selbst werden von akkreditierten Laboratorien im Deutschen Kalibrierdienst durchgeführt. Mit der Ent-

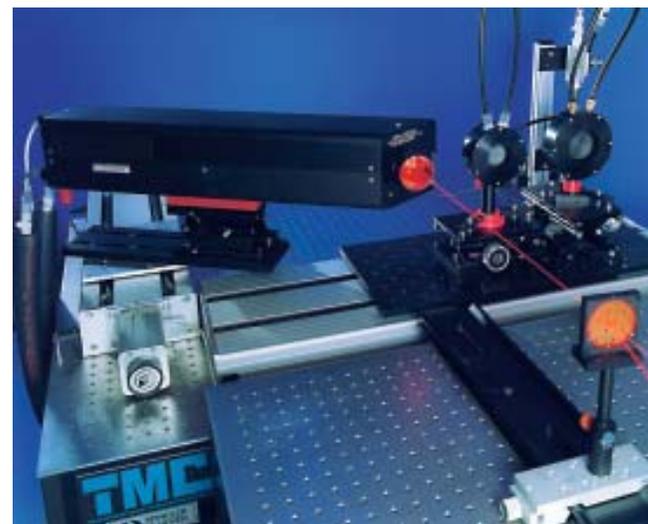


Bild 1: Messplatz für die Kalibrierung von Hochleistungslasermessern. Der sichtbare Strahl des He-Ne Lasers dient als Justierhilfe.

wicklung neuer Messverfahren und deren Transfer in die Praxis sowie ihrer Mitarbeit bei der Erarbeitung neuer akzeptierter Normen hat die PTB in den vergangenen Jahren zu einer wesentlichen Reduzierung der Dosis pro Röntgenaufnahme und damit zur Verminderung des strahleninduzierten Krebsrisikos beigetragen. Abschätzungen zeigen, dass die Strahlenbelastung für die Patienten nach Einführung der Funktionsprüfung bei der Röntgenfilmverarbeitung um etwa ein Viertel gesenkt werden konnte.

Da in der medizinischen Röntgendiagnostik in Zukunft zunehmend digitale Detektoren als Ersatz für Röntgenfilm-Folien-Systeme verwendet werden, befasst sich ein neues Arbeitsgebiet mit der Entwicklung von Messverfahren zur Kennzeichnung der Güte dieser digitalen Detektoren. Ein wesentlicher Parameter für die Güte ist der informationsbezogene Quantenwirkungsgrad (detective quantum efficiency, DQE). Im Rahmen von Drittmittel-geförderten Vorhaben werden mobile Messapparaturen entwickelt, welche es gestatten, an Röntgeneinrichtungen, die sich außerhalb der PTB bei Firmen oder in Krankenhäusern befinden, den informationsbezogenen Quantenwirkungsgrad DQE zu messen. Ergänzt werden die Untersuchungen an digitalen Röntgenbild-Detektoren durch die Entwicklung von Verfahren zur Messung der DQE von digitalen elektronischen Kameras.



Bild 2: Ebenheitsnormal mit 550 mm Durchmesser am neuen Messplatz für die ultrapräzise Formmessung an ebenen und schwach gekrümmten Flächen

### Femtosekunden-Laser Messtechnik

Im Projekt Femtosekunden-Messtechnik werden Femtosekundenimpulslaser benutzt, um zeitaufgelöste Messtechniken für ultraschnelle elektrische Signale zu entwickeln. Dabei wird die hohe Spitzenleistung von Femtosekunden-Laserimpulsen zur Untersuchung nichtlinearer optischer Prozesse ausgenutzt. Nachdem kürzlich die Erzeugung und der Nachweis von Pikosekunden-Spannungsimpulsen gezeigt wurde, können im Ergebnis der laufenden Arbeiten jetzt die Pikosekunden-Spannungsimpulse auf verschiedene elektrische Bauelemente übertragen werden und der elektrische Messtechnik auf ultrakurzen Zeitskalen nutzbar gemacht werden (Bild 3).

Ein weiterer Schwerpunkt der Femtosekunden-Messtechnik ist die Untersuchung nichtlinearer optischer Bauelemente, deren Transmission sich bei steigender Bestrahlungsstärke der Laserstrahlung verringert. Solche Materialien in geeigneter optischer Anordnung können dazu dienen, die transmittierte Energie von Laserpulsen zu begrenzen. Ein optischer Begrenzer auf der Basis eines Halbleitermaterials für 100-fs-Laserimpulse wurde demonstriert und könnte weitreichende Anwendungen im Augenschutz finden.

### Atomuhren der Gegenwart und Zukunft – neue Trends

Die primären klassischen Atomuhren CS1 und CS2, die einen thermischen Atomstrahl benutzen und seit vielen Jahren im Dauerbetrieb arbeiten, bilden immer noch das Rückgrat der Darstellung der deutschen Atomzeitskala UTC(PTB) und tragen damit auch wesentlich zur universellen koordinierten Weltzeit (UTC) bei. Die von CS1 und CS2 erzeugten Sekundenmarken weichen im langzeitigen Mittel um weniger als  $1 \cdot 10^{-14}$  s von der „idealen“ Atomsekunde ab, was weniger als einer Nanosekunde pro Tag entspricht. Daneben trägt seit Juli 2000 die Caesiumfontäne CSF1 zur Bestimmung der Skaleneinheit Sekunde bei. Sie wurde im Jahre 2001 um einen zusätzlichen Mikrowellenresonator erweitert, so dass alle Caesiumatome in der Uhr in einem einzigen Hyperfeinzustand sind. Damit konnte die relative Unsicherheit auf etwa  $1 \cdot 10^{-15}$  reduziert werden – bei gleichzeitig erhöhter Kurzzeitstabilität.

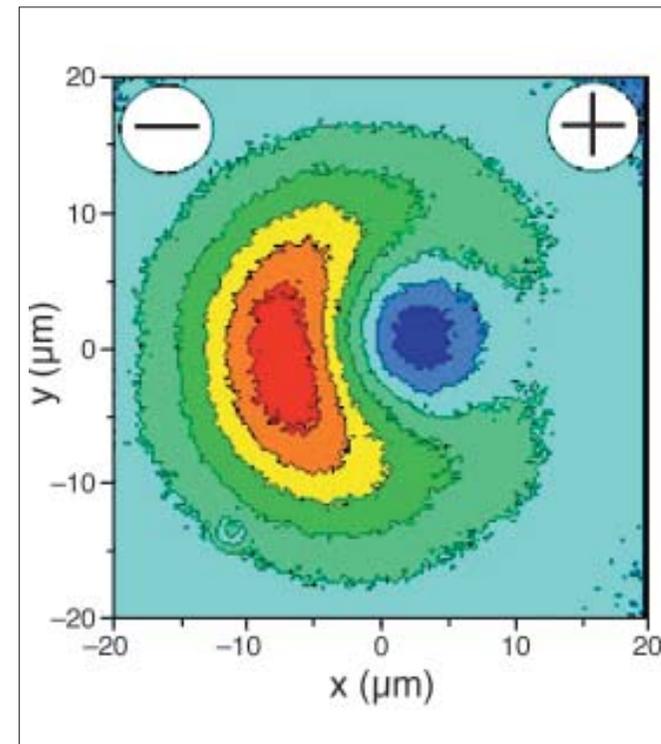


Bild 3: Einfluss eines elektrischen Feldes auf die Photolumineszenz in einem elektrisch vorgespannten Halbleiterfilm zur Ermittlung der Ladungsträgerverteilung für die Erzeugung ultrakurzer elektrischer Impulse

Die stetige Steigerung der Genauigkeit der Uhren führte in der Vergangenheit zu neuen Anwendungsbereichen wie der Satellitennavigation mit breiten wirtschaftlichen Auswirkungen, die erst jetzt richtig genutzt werden. Der stürmische Fortschritt bezüglich der Genauigkeit der Uhren ging mehrmals einher mit einer drastischen Erhöhung der Frequenz des Uhrenoszillators; so beim Übergang von den Pendel- zu den Quarzuhren oder von dort zu den Atomuhren mit Frequenzen im Mikrowellenbereich. Gegenwärtig kündigt sich ein ähnlicher Sprung zu zukünftigen optischen Atomuhren an, bei denen die Frequenz eines Lasers auf eine atomare Absorptionslinie stabilisiert wird.

Im vergangenen Jahr wurden in diesem Bereich in der PTB wesentliche Fortschritte erzielt: Die Frequenz eines auf einen optischen Übergang in einem Ytterbium-Ion stabilisierten Lasers wurde mit einer relativen Unsicherheit von weniger als  $1 \cdot 10^{-14}$  bestimmt. Das Ytterbium-Normal gehört somit weltweit zu den optischen Frequenznormalen mit den kleinsten Unsicherheiten. Etwas größer ( $< 3 \cdot 10^{-14}$ ) ist die relative Unsicherheit, die mit dem Calcium-stabilisierten Laser erreicht wurde. Damit sind optische Frequenznormale den meisten primären Uhren im Mikrowellenbereich ebenbürtig, bis auf die Cs-Fontänenuhren, deren Realisierungsunsicherheit heute noch etwa eine Größenordnung besser ist. Abschätzungen, z. B. beim

Ytterbium-Einzelionenfrequenznormal, lassen erwarten, dass auch diese Unsicherheiten unterschritten werden können. Zur experimentellen Prüfung dieser Erwartung hat die PTB im vergangenen Jahr diesen Arbeitsbereich personell verstärkt.

Daneben wurde ein Projekt *Quantenoptik mit ultrakalten Atomen* neu eingerichtet, das u. a. die Frage klären soll, inwieweit optische Frequenznormale auf der Basis neutraler Atome solchen mit einzelnen gespeicherten Ionen ebenbürtig oder überlegen sein können. In der Vergangenheit hatte sich gezeigt, dass bei den Neutralatomen die erreichbare Genauigkeit insbesondere durch die restliche Geschwindigkeit der Absorber begrenzt wird. Mit einer von der PTB gemeinsam mit der Universität Hannover entwickelten neuartigen Laserkühlmethode können jetzt auch die für optische Frequenznormale relevanten Atome in den Mikrokelvinbereich abgekühlt werden. Mit den so erzeugten ultrakalten Calcium-Atomen konnte gleichzeitig nachgewiesen werden, dass Frequenzabweichungen auf Grund von Unvollkommenheiten in den zur Anregung benutzten optischen Wellenfronten um eine Größenordnung reduziert werden (Bild 4).

Auf dem Weg zur optischen Atomuhr der Zukunft kommt der jüngsten Entwicklung von Femtosekunden-Lasern zur optischen Frequenzmessung höchste Bedeutung zu, da

damit beliebige optische Frequenzen in einfacher Weise kohärent in den Mikrowellenbereich heruntergeteilt werden können. In der PTB konnte jetzt für den Vergleich zweier optischer Frequenzen gezeigt werden, wie bei geeigneter Anwendung des so genannten Transferoszillatorprinzips zusätzliche Fehlerbeiträge durch das Frequenzrauschen des Femtosekundenlasers vermieden werden können. In einem vielbeachteten Experiment wurde gezeigt, dass der relative Fehler zweier optischer Frequenzen kleiner als  $10^{-18}$  war.

Damit kann erwartet werden, dass in wenigen Jahren optische Uhren präziser als die Cs-Atomuhren werden. Allerdings werden optische Uhren die SI-Einheit Sekunde nie besser darstellen können als die besten Caesium-Atomuhren, solange die Sekunde über 9 192 631 770 Schwingungen eines Mikrowellenübergangs im Caesiumatom definiert ist. Dessen ungeachtet werden optische Uhren die Messgenauigkeit bei fundamentalen Untersuchungen zu neuen Grenzen treiben und stabilere Zeitskalen erlauben. Ob sie eines Tages auch Basis für eine neue Definition der Zeiteinheit werden, bleibt abzuwarten.

Die Durchführung dieser unterschiedlichen Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten ist ohne die Einwerbung von Fremdmitteln und ohne zusätzliche Mitarbeiter nicht möglich. Im Jahr 2001 wurden mehrere neue Drittmittelprojekte z. B. im Rahmen eines Schwerpunktprogramms der Deutschen Forschungsgemeinschaft (Wechselwirkung in ultrakalten Atom- und Molekülgasen), der Europäischen Gemeinschaft (3 D Reflectometry, DQE of digital X-ray imaging detectors und Certified Reference Materials for Optical Telecommunication Wavelengths) begonnen.

Bild 5: Im Jahre 2001 arbeiteten in der Abteilung Optik zwölf junge Forscher an ihrer Doktorarbeit. Von rechts nach links vor dem Neubau der Abteilung Optik: S. Winter, N. Haverkamp, H. Stoehr, M. Bieler, H. Illers, A. Nevejina-Sturhan, W. Willemer, T. Binnewies, G. Wilpers, T. Schneider; ohne A. Wolf und C. Degenhardt

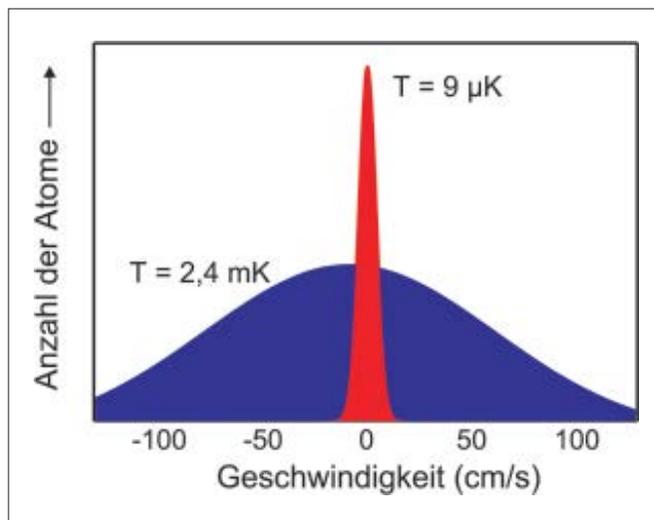


Bild 4: Eine in der PTB entwickelte neuartige Methode der Laserkühlung erlaubt jetzt auch die Erzeugung ultrakalter Atome für optische Frequenznormale.



## In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

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

### Grundlagen der Metrologie

#### Neuartige optische Dunkelfeldmikroskopie zur Strukturbreitenmessung

Ein auf alternierender seitlicher Beleuchtung im streifenden Einfall basierendes neuartiges lichtoptisches Dunkelfeld-Mikroskopieverfahren erlaubt die Messung von Strukturbreiten bis in den Sub-Wellenlängenbereich herab. Gegenüber konventionellen lichtoptischen Mikroskopieverfahren werden die Auflösung und die Kantenlokalisation verbessert.

#### Femtosekundenlaser als Optischer Frequenzkammgenerator

Mit einem Femtosekundenlaser wurde gezeigt, dass das Verhältnis zweier optischer Frequenzen mit einem relativen Fehler von weniger als  $10^{-18}$  bestimmt werden kann.

#### Pikosekunden-Spannungsimpulse

Die mit Femtosekundenlasern und optoelektronischen Schaltern erzeugten Pikosekunden-Spannungsimpulse können jetzt in eine Vielzahl koplanarer elektronischer Schaltungen übertragen werden.

#### Alterungsuntersuchungen an UV-Strahlernormalen

Ein neuer Messplatz ermöglicht die Charakterisierung von gleichzeitig mehreren UV-Strahlern durch Messung sowohl integraler als auch spektraler Strahlungssignale und erlaubte die Selektion und Optimierung eines neuen Transfer- bzw. Bezugsnormals.

#### Änderung der Reflexionseigenschaften von Spectralon

Spectralon ist als Vergleichsmaterial für einen durch das beratende Komitee für Photometrie und Radiometrie (CCPR) geplanten Schlüsselvergleich über den diffusen Reflexionsgrad vorgesehen. Neue Messungen in der PTB zeigen selbst unter schwacher optischer Bestrahlung, wie sie in einer Kalibrierapparatur vorliegt, eine merkliche Degradation des Reflexionsgrades.

### Goniophotometer

Für die Realisierung der Lichtstromeinheit mit nationalen Normalen zur Weitergabe dieser Einheit bei bekannter Äquivalenz zu globalen Referenzwerten sowie zur Bestimmung der winkelabhängigen Verteilungen von colorimetrischen und spektroradiometrischen Größen wurde ein völlig neues Gerätekonzept für ein Goniophotometer entwickelt. Dieser neue Messgerätetyp besteht aus drei Großrobotern, deren Aufbau im Neubau der Abteilung Optik erfolgen wird.

### Caesium-Fontänenuhr

Durch Selektion der Atome in einem einzigen Hyperfein-Unterzustand konnten die relative Unsicherheit und die Instabilität, mit denen die Caesium-Fontäne CSF1 der PTB zur Internationalen Atomaren Zeitskala TAI (Temps Atomique International) beiträgt, weiter reduziert werden.

### Messung der lokalen Positionsinvarianz

Die Gültigkeit des so genannten Prinzips der lokalen Positionsinvarianz konnte durch den Vergleich zwischen der primären Caesium-Atomuhr der PTB CSF1 und einem Wasserstoffmaser mit einer um einen Faktor 20 kleineren Unsicherheit bestätigt werden, als es zuvor möglich war.

### Absolutmessung der Übergangsfrequenz von Yb\*

Eine optische Übergangsfrequenz des Ions  $^{171}\text{Yb}^+$  wurde mit einer relativen Unsicherheit von  $1 \cdot 10^{-14}$  gemessen. Diese Arbeiten bilden die Basis für eine zukünftige optische Atomuhr.

### Bestimmung der Frequenz des optischen Ca-Frequenznormals

Die relative Unsicherheit der optischen Frequenz des Ca-Frequenznormals wurde um einen Faktor acht auf  $3 \cdot 10^{-14}$  verringert. Grundlage dafür waren zum einen die Erfassung und Kompensation von restlichen frequenzverschiebenden Phasenfehlern bei der optischen Anregung der kalten Ca-Atome und zum anderen eine verbesserte Frequenzmessung mit einem in der PTB entwickelten Frequenzkammgenerator.

### Atominterferenzen mit ultrakalten Erdalkali-Atomen

Mit einem neuen optischen Verfahren, der Quench-Kühlung, lassen sich Wolken von Calcium-Atomen mit einer Temperatur unter  $10 \mu\text{K}$  präparieren, die einen höheren Kontrast von Atominterferenzen und eine geringere Unsicherheit des Ca-Frequenznormals ermöglichen.

### Metrologie für die Wirtschaft

#### Ultrapräzise Formmessung an planen und schwach gekrümmten Flächen

Zur ultraprazisen Formmessung an planen und schwach gekrümmten optischen Flächen mit Unsicherheiten im Sub-Nanometer-Bereich wurde eine neue Scanning-Messapparatur aufgebaut. Das Messprinzip basiert auf Differenzmessungen von Reflexionswinkeln an der Prüflingsoberfläche mit großem lateralen Versatz (Shear) der Messorte.

#### Neue metrologische Aufgaben im Bereich der digitalen Röntgenbildgebung

In der medizinischen Röntgendiagnostik findet ein Wandel von der analogen zur digitalen Aufnahmetechnik statt. Um die Bildqualität dieser digitalen Röntgendetektoren zu messen und zu vergleichen, wird ein mobiler Messplatz entwickelt, mit dem wichtige Detektor-Kenngrößen vor Ort ermittelt werden können.

#### Kalibrierung großflächiger Photometer mit Photovoltaik-Messtechnik

Nach Optimierung des Solarzellenkalibrierstandes auf gute Homogenität können auch großflächige Photometerköpfe bezüglich spektraler Empfindlichkeit kalibriert werden.

### Metrologie für die Gesellschaft

#### Geschützter Bereich bei Laserschutzbrillen

Auf der Basis eines neuen Messverfahrens wurde eine objektive Definition des geschützten Bereiches von Laserschutzbrillen entwickelt, die in die entsprechenden Normen für Laserschutzbrillen übernommen wurde.

#### Gefährdungsbereiche durch ultraviolette Strahlung beim Schweißen

Ausgehend von der UV-Emission von Schweißlichtbögen wurde in einer Sicherheitsanalyse für das Umfeld von Schweißarbeitsplätzen der Sicherheitsabstand bestimmt.

### Optischer Begrenzer

Zum Schutz des Auges vor Femtosekundenlaserstrahlung wurde ein Halbleiterbauelement als schneller optischer Begrenzer entwickelt.

### Induzierte Transmission bei Alexandrit

Eine Vielzahl gängiger Filter gegen gütegeschaltete Alexandrit-Laser zeigte in einer Studie den Effekt der induzierten Transmission.

### Internationale Angelegenheiten

#### Internationaler Vergleich der optischen Leistungsmessung in den Telekommunikationsbändern

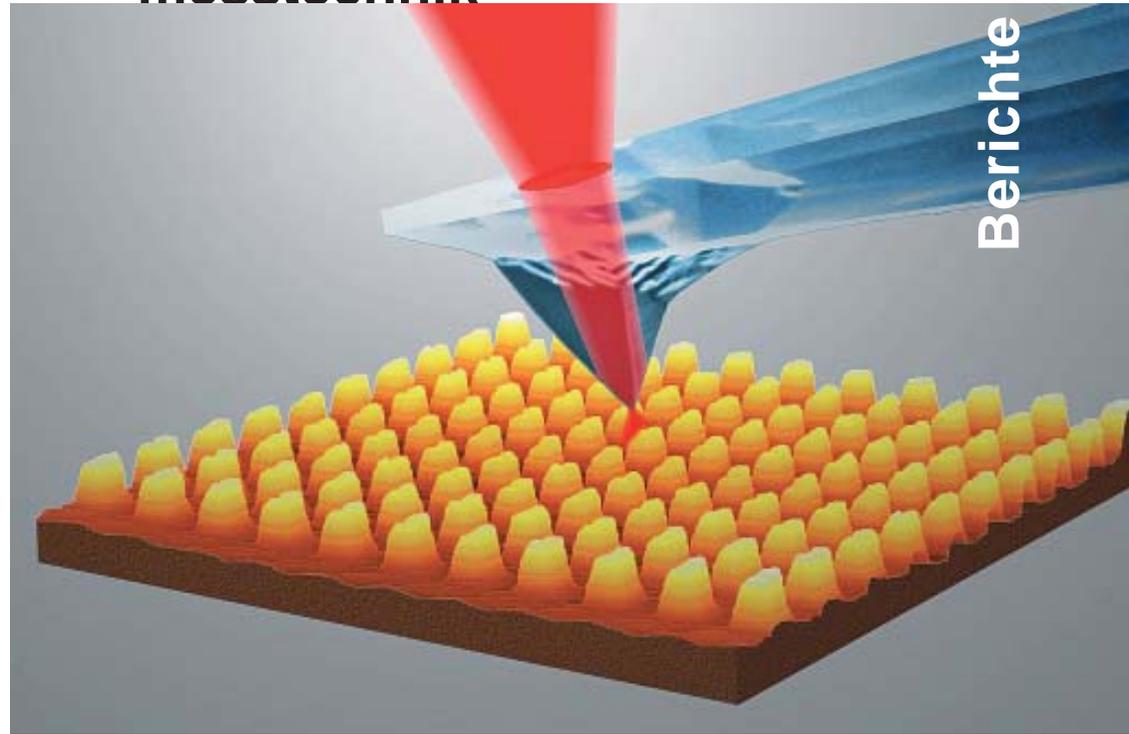
Für die optische Nachrichtentechnik sind fasergebundene Leistungsmessungen von großer Bedeutung. In einem bilateralen Vergleich mit dem NIST (USA) zeigte sich im optischen Fenster um  $1550 \text{ nm}$  sehr gute Übereinstimmung.

#### Zertifizierte Referenzmaterialien für optische Telekommunikationswellenlängen

In einem von der PTB koordinierten EÜ-Projekt werden u. a. spezielle Faser-Bragg-Gitter und molekulare Absorber entwickelt und auf ihre Eignung als Wellenlängenreferenzen im Wellenlängenbereich  $> 1,5 \text{ mm}$  untersucht.

Fertigungs-  
messtechnik

Berichte der Abteilungen



# Fertigungsmesstechnik

Die Abteilung *Fertigungsmesstechnik* ist in drei Fachbereiche gegliedert mit insgesamt sechs Fachlaboratorien, fünf ausgewiesenen Projekten und dem Referat *Wissenschaftlicher Gerätebau*. Dessen Nähe zu den Laboratorien der Fertigungsmesstechnik erweist sich auf Grund zunehmender Verknüpfung zwischen Fertigung und dimensioneller Präzisionsmessung als produktiv. Sie ist in einigen Fällen die Erklärung für einmalige Kompetenz und exzellente Leistungen des Gerätebaus, so z. B. für die Beteiligung am STEP-Programm (Satellite Test of Equivalence Principle). Ohne seine Dienstleisterfunktion für die PTB zu vernachlässigen, profiliert sich der Wissenschaftliche Gerätebau schrittweise zu einer Organisationseinheit, die zukunftsorientiert eigenständig oder in Kooperation mit Fachlaboratorien sowie einschlägigen externen Einrichtungen Forschungs- und Entwicklungsaufgaben löst. Damit wird erreicht, den zunehmenden Aufgaben z. B. der Ultrapräzisionsfertigungstechnik oder der Dünn-schicht-, Füge- und Mikrotechnik gewachsen zu sein.

In der Abteilung sind insgesamt 164 Mitarbeiter tätig, davon 80 Wissenschaftler und Ingenieure. Das Stammpersonal wird ergänzt durch 16 Drittmittelbeschäftigte sowie 25 Gastwissenschaftler und Studenten. Die Gastwissenschaftler kommen zu einem beträchtlichen Anteil aus chinesischen und osteuropäischen Forschungseinrichtungen.

Extern finanziell geförderte F&E-Projekte sind einer der Indikatoren für angestrebten Transfer von Forschungsergebnissen in die Wirtschaft. Gegenwärtig werden zwölf EU-Vorhaben, 13 BMBF-, BMWi- bzw. DFG-Vorhaben sowie zwölf durch die Industrie geförderte Vorhaben bearbeitet.

Titelbild  
Prinzipdarstellung der Abtastung eines zweidimensionalen Kalibriergitters mittels optischer Nahfeldmikroskopie

Die Bedeutung, die der Normung und Gremienarbeit beigemessen wird, ist an der aktiven Mitarbeit in über 20 internationalen und nationalen Gremien und Ausschüssen erkennbar. Die Mitarbeit bezieht sich auf ein breites Themenspektrum, das von Geometrischer Produktspezifikation über Koordinatenmesstechnik und Maskenqualifikation (SEMI) bis zur Metrologie in der Mikro- und Nanotechnik reicht. In mehreren Gremien werden seit Jahren fachlich anerkannte Leitungsfunktionen wahrgenommen.

Eine ausgewiesene Orientierung des verfügbaren F&E-Potenzials auf den künftigen Bedarf der Industrie und der einschlägigen Forschungslandschaft erfolgt mit einem 2001 erarbeiteten und abgestimmten, fortschreibungsfähigen „F&E-Programm 2001 bis 2005 der Abteilung Fertigungsmesstechnik der PTB, ausgerichtet auf den Bedarf in Industrie und Wissenschaft“.

Der folgende fachbezogene Teil des Berichts bezieht sich auf die beiden Themenkreise „Nanometrologie“ und „1-D-Präzisions-Längenmesstechnik“.

## Nanometrologie, Stand und Tendenzen

In der Abteilung Fertigungsmesstechnik werden zwei Themenkreise als wissenschaftliche Schwerpunkte mit besonderer Bedeutung für das Arbeitsgebiet Nanometrologie und angrenzende Bereiche angesehen:

- das bessere Verständnis und die Berücksichtigung physikalischer Wechselwirkungen zwischen Detektionssystem und Messobjektoberfläche bzw. oberflächennahem Bereich als einem grundlegenden Problem dimensioneller Präzisionsmessungen
- die quantitative Rastersondenmikroskopie als eine vielversprechende Messtechnik insbesondere für die Lösung dimensioneller – aber auch anderer – Messaufgaben mit erreichbaren Messunsicherheiten bis in den Sub-Nanometer-Bereich.

In den letzten Jahren hat sich die dimensionelle Messtechnik für die Nanotechnologie in der Abteilung deutlich weiterentwickelt. Stimuliert wurde dies nicht zuletzt durch die Mitarbeit in (bzw. Koordination von) einer Reihe von Vorhaben, die durch die Nanotechnologieinitiative des BMBF bzw. von der EU gefördert werden, aber auch durch zunehmende Nachfrage aus Forschungsinstituten und der Industrie.

Zu einer Reihe von Problemstellungen der Nanometrologie – hier im Sinne der Rückführung von Messergebnissen auf die Längeneinheit – liegen inzwischen Erfahrungen vor (Kenngrößen zur Referenznormalen der Oberflächenmesstechnik, der Schichtdickenmessung oder der Mikro- und Nanohärtemessung sowie des Nanoindentation-Verfahrens). Dazu zählen weiterhin herausfordernde produktnahe Problemstellungen wie die quantitative Untersuchung der Geometrie von Mikro- oder Nanostrukturen, die wegen des geringeren Ortsauflösungsvermögens alternativer Messsysteme zumeist nur rasterkraftmikroskopisch messbar sind.

Die Grundlage für das Erreichte bildet die quantitative Rastersondenmikroskopie, deren Ergebnisse auf die Längeneinheit rückführbar sind. Hier erweist sich vor allem ein seit mehreren Jahren eingesetztes Rasterkraftmikroskop (SFM) vom Typ VERITEKT B als metrologisches „Arbeitspferd“ im Routineeinsatz (Bilder 1a und 1b). Es ist ein SFM, das zusätzlich mit drei Laserinterferometern ausgestattet wurde, die in Richtung der drei Bewegungsachsen des Scanners Messabweichungen rückführbar korrigieren. Bei den Laserinterferometern werden die Interferenzsignale der  $\lambda/2$ -Punkte als Referenzinformation für das Kalibrieren genutzt. Die dem Kalibrieren von „Makro“-Koordinatenmessgeräten zu Grunde liegenden Lösungsmodelle nutzend und teils sogar vervollkommend, werden damit Kalibrier- und Messunsicherheiten bis in den Sub-Nanometer-Bereich erzielt.

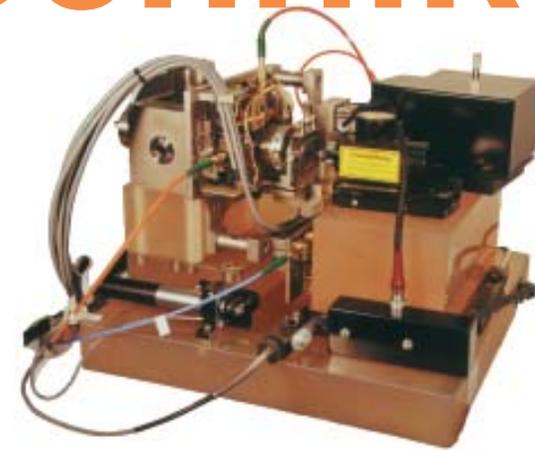


Bild 1a: Rasterkraftmikroskop VERITEKT B, Gesamtansicht

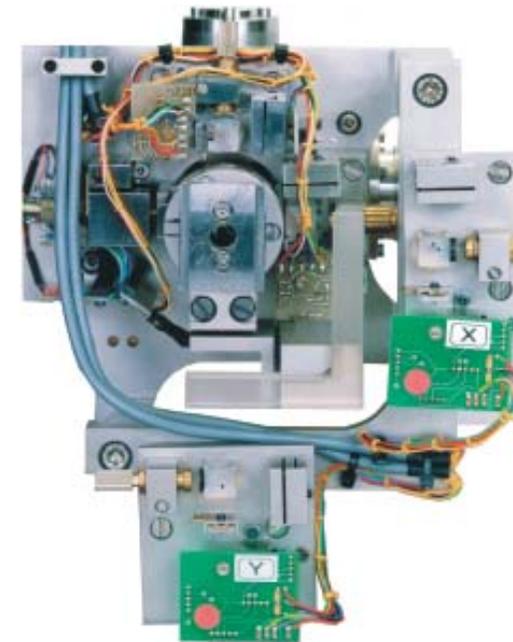


Bild 1b: Rasterkraftmikroskop VERITEKT B mit den drei Laserinterferometern für seine Kalibrierung, ohne Detektionssystem

Laserinterferometer sind aufgrund der oftmals auftretenden periodischen Nichtlinearität im Nanometer-Bereich weniger für den direkten Einsatz in Scannern geeignet. Eine Lösung dieses Problems kann der Einsatz von Röntgeninterferometern sein. Hier beruht die Wegmessung auf dem sehr genau bekannten Gitterabstand von Silizium. Ein hybrider Aufbau aus einem Rastertunnelmikroskop und einem monolithischen Röntgeninterferometer zeigte bei Messungen an einem lateralen Normal ermutigende Ergebnisse.

Für das Kalibrieren von Normalen für die Rastersondenmikroskopie sind eine Reihe von Methoden entwickelt worden. Sie werden routinemäßig eingesetzt. Insbesondere beim Kalibrieren von lateralen Normalen mit Periodenlängen unterhalb etwa 250 nm ist man auf die Rastersondenmikroskopie oder andere hochauflösende mikroskopische Verfahren angewiesen.

Für das Kalibrieren von Stufenhöhennormalen werden Rastersondenmikroskope in Ergänzung zu Interferenzmikroskopen genutzt. Im Falle sehr kleiner (lateraler) Strukturen bieten Rastersondenmikroskope mit ihrem besseren lateralen Auflösungsvermögen die einzige Möglichkeit.

Gegenwärtig bereits produktionswirksame Nanotechnologien sind zu einem hohen Anteil eng mit modernster Oberflächenbearbeitung verknüpft. So überrascht es nicht, dass die Bestimmung der Dicke sehr dünner Schichten („Nanoschichten“) zunehmendes Interesse erlangt. Dies berücksichtigend, gilt neben der Entwicklung einer rückführbaren Messtechnik für Schichten im Mikrometerbereich die Aufmerksamkeit verstärkt den Nanoschichten. Hier wird abteilungsübergreifend in einem Forscherverbund mit einer Reihe von Instituten an der Herstellung von geeigneten Normalen (Bild 2) und Kalibrier-techniken gearbeitet. Im Bereich der Nanoschichten sind die Röntgenreflektometrie und die optische Ellipsometrie bisher vorherrschende Messtechniken. Allerdings ist die Rückführung der Ergebnisse auf die Längeneinheit zweckmäßig, wenn das vorhandene Genauigkeitspotenzial ausgeschöpft werden soll. Eine erhebliche Herausforderung stellt das Herstellen geeigneter Normale dar, die neben einer definierten homogenen Schicht auch lateral strukturiert sein müssen, damit

topografische Messungen mit SFM möglich sind. Erste Erfolge gibt es bei C-Ni-C-Schichten auf Quarz und bei SiO<sub>2</sub>-Schichten auf Si.

Das Nanoindentation-Verfahren – ein aus der Nano-Härtemessung abgeleitetes Verfahren – dient der Ermittlung mechanischer Eigenschaften (Elastizitätsverhalten, Härte, ...) von ultradünnen Schichten. Um die quantitative Aussagefähigkeit dieses Verfahrens deutlich zu verbessern, werden im Rahmen von EU-Vorhaben Strategien entwickelt, die geeignete Referenzmaterialien und die Kalibrierung der Eindringkörpergeometrie mittels Rasterkraftmikroskopie einschließen.

F&E-Vorhaben sind in der Abteilung seit Jahren auch auf Beiträge zur optischen Nahfeldmikroskopie gerichtet. Das Themenspektrum erstreckt sich von metrologischen Problemstellungen im engeren Sinne, z. B. Entwicklung spezifischer Maßverkörperungen für die Nahfeldmikroskopie, bis zu Fragestellungen, deren Ergebnisse als Produkte wirtschaftlich vermarktet sind (Technologie-Transfer). So wurde ein neuartiges optisches Nahfeldmikroskop entwickelt, mit dem sich die optischen Eigenschaften von Maßverkörperungen und Werkstoffen mit hoher lateraler Auflösung bestimmen lassen. Aufgrund des kompakten Aufbaus und des speziellen Designs kann der Mikroskopkopf in den Revolver eines optischen Standardmikroskops eingeschraubt werden (Bild 3). Außerdem erlaubt dieses Mikroskop die direkte optische Betrachtung von Probe und Sonde während der simultan erfolgenden rasterkraftmikroskopischen und nahfeldoptischen Messung.

Die Abteilung engagierte sich im Rahmen des Kompetenzzentrums *Ultrapräzise Oberflächenbearbeitung* (CC UPOB) in der Organisation und Durchführung von einschlägigen wissenschaftlichen Veranstaltungen. So fand vom 5. bis 7. September das erste chinesisch-deutsche Symposium „Micro Systems and Nano Technology“ mit über 30 Vorträgen bekannter chinesischer und deutscher Fachleute in Braunschweig statt. Am 15./16. November fand das Internationale Seminar „NanoScale 2001“ statt, das sich mit nanoskaligen Kalibriermethoden und -normalen sowie dem dimensionellen Messen im Mikro- und Nanobereich befasste. Mehr als 60 Fachleute nahmen an dem Seminar teil, das im Technopark Bergisch-Gladbach stattfand.

Zur Nanometrologie sind eine Reihe von neueren Problemstellungen erkennbar, die den Inhalt künftiger Arbeiten beeinflussen/bestimmen werden. Sie seien hier nur schlagwortartig genannt:

- Vergrößerung des Messbereichs von Rastersondenmikroskopen
- zeitsparende, rationelle Parallelabtastung statt Linienscan als Teil eines Flächenscans
- Einsatz der Röntgeninterferometrie auch für z-Achse von Rastersondenmikroskopen
- Einsatz von quasi-kontaktlosen Antastverfahren in der Rasterkraftmikroskopie
- genauere Untersuchung der Wechselwirkung Tastspitze – Oberfläche
- Kraftmessung im Sub- $\mu$ N-Bereich
- verstärkte Richtlinien-/Normungsaktivitäten.

### Entwicklungen in der 1-D-Präzisions-Längenmesstechnik

Seit Anfang der 90-er Jahre wurde ein ab 1975 im ehemaligen Amt für Standardisierung, *Meßwesen und Warenprüfung* (ASMW) eingesetzter und inzwischen metrologisch weiter verbesserter Interferenzkomparator für hochgenaue 1-D-Messungen – vor allem an strichartigen Teilungen – als Längenkomparator der PTB genutzt. Seine Längenmessunsicherheit wurde mit  $U = [(20)^2 + (0,055 \cdot L)^2]^{1/2}$  nm mit  $L$  in mm abgeschätzt.

Der Komparator wurde im Jahre 2001 in der PTB stillgelegt und zur Nutzung an das chinesische metrologische Institut (NIM, Beijing) übergeben.

Etwa 1995 wurde in der PTB – in Kooperation mit maßgeblichen Geräteherstellern – mit der Entwicklung und dem Aufbau eines neuen Komparators – „Nanometerkomparator“ – begonnen. Der Komparator ist mit einem im Vakuum betriebenen Interferometer ausgestattet. Er wurde im Jahre 2000 in der PTB aufgestellt und in Betrieb genommen. Danach erfolgten die vorgesehene Umstellung des Interferometers auf das Heterodynverfahren und weitere Optimierungsarbeiten. Erste Messungen an Strichmaßstäben mit dem nun verfügbaren Heterodyn-Interferometer wurden Ende 2001 durchgeführt. Abschätzungen der mit dem Nanometer-Komparator erreichbaren und für hochgenaue Messungen in Industrie und Wissenschaft auch geforderten Mess-



Bild 2: Schichtdicken-Maßverkörperung mit C-Ni-C- bzw. Ni-Schichtsystemen auf Quarzsubstrat, Anwendungsbereich: Röntgenreflektometrie



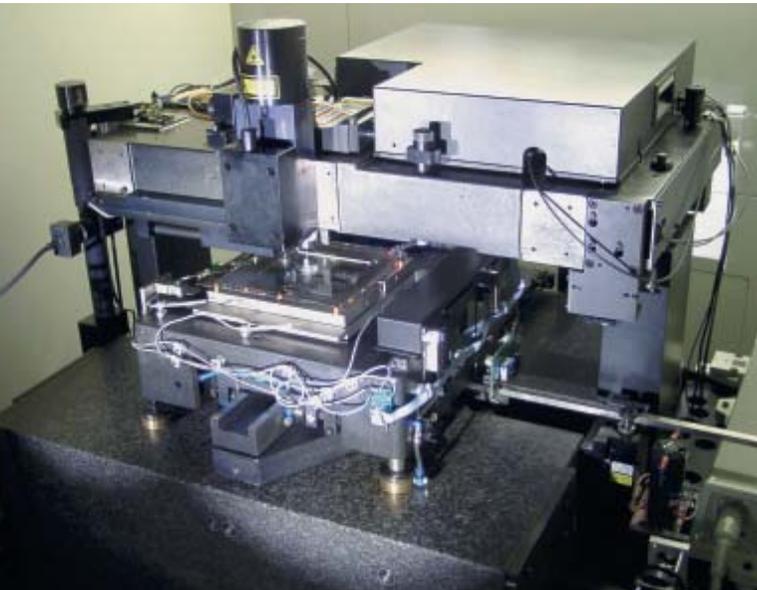
Bild 3: Neu entwickeltes kompaktes optisches Nahfeldmikroskop, dessen Mikroskop-Messkopf in den Revolver eines optischen Standardmikroskops eingeschraubt ist



Bild 4: Interferometeraufbau des neuen Nanometerkomparators

unsicherheiten ergeben z. B. für Strichmaßkalibrierungen  $U = [(3)^2 + (0,003 \cdot L)^2]^{1/2}$  nm mit  $L$  in mm. Hierbei interessieren neben der Kalibrierung der Gesamtlängen von Maßverkörperungen auch genaue Bestimmungen der Einzelteilungsabweichungen von z. B. inkrementellen Messsystemen über kleinere Längensbereiche oder aber Vergleichsmessungen von anderen Interferometer-Messsystemen gegen das Vakuum-Interferometer des Nanometer-Komparators (Bild 4).

Im Zeitraum des Übergangs zum neuen Nanometerkomparator kommt anderen Messmöglichkeiten der Abteilung eine erhöhte Bedeutung für die Sicherung der Weitergabe des Längenmaßes zu, auch im Rahmen des Deutschen Kalibrierdienstes. Hierzu zählen vor allem die im Reinraum der PTB sonst für Kalibrierungen an zweidimensionalen Messobjekten – wie z. B. Photomasken – eingesetzten Maskenkomparatoren (LMS und EOMS). In Messbereichen bis zu 300 mm sind insbesondere mit dem optischen Maskenkomparator LMS (Bild 5) auch Kalibrierungen an eindimensionalen Längenmaßverkörperungen wie z. B. Strichmaßen durchführbar. Die mit dem LMS erreichbaren Messunsicherheiten für die Weitergabe des Längenmaßes werden mit  $U = [(10)^2 + (0,15 \cdot L)^2]^{1/2}$  nm mit  $L$  in mm abgeschätzt.



Am 28. und 29. November wurde über den Themenkreis während des 159. PTB-Seminars „Präzise 1-D- und 2-D-Längenmesstechnik“ in Braunschweig berichtet und diskutiert. An dem internationalen Seminar nahmen rund 80 Fachleute aus zwölf Ländern teil.

Bild 5: Ansicht des optischen Maskenkomparators LMS 2020

Ein vom BIPM initiiertes und von der PTB koordinierter internationaler Maßvergleich an Strichmaßstäben („Nano3“) wird im Jahr 2002 abgeschlossen. An dem Maßvergleich sind 14 metrologische Institute beteiligt.

Die benutzten zwei Strichmaßstäbe mit Teillängslängen von 280 mm und aufgetragenen Präzisions-Chromstrichteilungen auf Quarz- bzw. Zerodursubstraten wurden eigens für den Maßvergleich hergestellt, um eine möglichst optimale Strukturqualität der anzutastenden Strichteilungen zu erzielen.

Bereits vorliegende Messergebnisse von Teilnehmern, bei denen die Strichantastungen mit ganz unterschiedlichen Mikroskopen erfolgten, bestätigen die hervorragende Strukturkantenqualität der Strichteilungen. Die Strukturqualität der maßverkörpernden Teilungsstriche ist eine wesentliche Voraussetzung, um die Längenskalen der teilnehmenden Institute mit möglichst geringer Unsicherheit vergleichen zu können. Präzise Bestimmungen des thermischen Ausdehnungsverhaltens, der Längenskompressibilität und des Langzeitverhaltens der verwendeten Substratmaterialien sind zusätzliche Maßnahmen, mit denen die Messergebnisse objektiviert werden.

## In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

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

### Grundlagen der Metrologie

#### Verbindung von Rastersondenmikroskop und Röntgeninterferometer – ein Gerät zur hochgenauen Kalibrierung von Normalen

Es wurde ein Messplatz bestehend aus einem Rastertunnelmikroskop und einem Röntgeninterferometer aufgebaut, mit dem sowohl die Topographie als auch interessierende laterale Merkmale eines Messobjektes simultan und hochauflösend bestimmt werden können.

#### Kompakter Sensor-Kopf für nahfeldoptische Rastermikroskopie

Für die simultane Rasterkraft- und Nahfeldmikroskopie wurde ein kompakter Sensor-Kopf auf der Basis von Si-Cantileversonden als Einschraubobjektiv zum Einsatz an Standard-Mikroskopen entwickelt.

#### Interferometrische Durchmesserbestimmungen von Silizium-Kugeln

Mit dem Vakuum-Kugelinterferometer der PTB wurden jetzt erstmals die Durchmesser von 90-mm-Silizium-Kugeln mit Reproduzierbarkeiten von 1 nm gemessen.

#### Hochgenaue Messungen wichtiger Materialparameter

Eine neu entwickelte Messapparatur erlaubt die Bestimmung der für dimensionelle Normale wichtigen Materialparameter thermischer Ausdehnungskoeffizient und Kompressibilität mit außerordentlich geringer Messunsicherheit.

#### Analyse des Bildkontrastes von REM-Messungen an Mikrostrukturen

Mit analytischen Verfahren sowie mittels Monte-Carlo-Simulationen wurden die an Vertiefungen von Mikrostrukturen im Rasterelektronenmikroskop beobachtbaren topographischen Bildkontraste modelliert und mit experimentellen Ergebnissen verglichen.

#### Der Winkelkomparator als Primärnormal der PTB

Für den Winkelkomparator wurde ein neues Auswerteverfahren für die Selbstkalibrierung auf Grundlage der Fouriertransformation entwickelt, wodurch eine verbesserte Messunsicherheitsangabe für den Komparator abgeleitet werden kann.

### Fehler von Fourier-Koeffizienten

Es wird über ein analytisches Verfahren zur Bestimmung der Fehler von Fourier-Koeffizienten berichtet, die bei Analyse von Funktionen entstehen, die auf endliche Intervalle beschränkt sind, welche nicht einem ganzzahligen Vielfachen der Grundperiode entsprechen.

### Messtechnik für die Wirtschaft

#### Interferenzmikroskop mit erweitertem Messbereich

Durch die Weiterentwicklung eines Interferenzmikroskopes sind nunmehr Kalibrierungen von Tiefeneinstellnormalen von bis zu 10 µm mit Messunsicherheiten von bis zu 3 nm möglich.

#### Zertifizierte Referenzsoftware für die Rauheitsmesstechnik (ISO 5436 Typ F1)

Eine Software für die Berechnung von Oberflächenkenngrößen nach ISO 4287 wurde entwickelt und entsprechend den Normen der Qualitätssicherung für Software zertifiziert. Es stehen jetzt auch geeignete „Software-normale“ für die Rauheitsanalyse zur Verfügung.

#### Messungen an Raunormalen mit einem Mehrwellenlängen-Diodenlaserinterferometer

Zur Untersuchung des Anwendungspotenzials des berührungslos messenden Mehrwellenlängen-Diodenlaserinterferometers in der Oberflächenmesstechnik wurden vergleichende Untersuchungen mit taktilen Messverfahren durchgeführt.

#### Rasterelektronenmikroskopie an Oberflächenstrukturen von Fein- und Feinsträhnen

Im Rahmen eines Europäischen Projekts wurden Untersuchungen zur Klassifizierung unterschiedlicher Oberflächendefekte an gezogenen dünnen Drähten mit dem Verfahren der Rasterelektronenmikroskopie sowie mit weiteren mikroskopischen Methoden durchgeführt.

**Entwicklung von Schichtdicken-Verkörperungen im nm-Bereich für die Ellipsometrie**  
Zur Kalibrierung von Ellipsometern wurden Schichtdicken-Verkörperungen mit einer SiO<sub>2</sub>-Schicht auf einem Si-Substrat entwickelt, die zudem vergleichende Kalibrierungen mit topographischen Messverfahren erlauben.

#### **Fortschritte bei der Rückführung von Schichtdickenmessungen**

Zur Kalibrierung von Schichtdickenmessgeräten wurden Schichtdicken-Verkörperungen für Ni-Schichten auf Cu-Substraten mit durchgehender und strukturierter galvanischer Beschichtung entwickelt (Schichtdicke 1 µm bis 20 µm).

#### **Inbetriebnahme des Basis-Koordinatenmessgeräts der 3-D-Mikromesseinrichtung**

Das Basis-Koordinatenmessgerät der 3-D-Mikromesseinrichtung (3-D-MME) wurde in der PTB aufgestellt. Erste interferometrische Untersuchungen zur Stabilität der Bewegungsachsen ergaben sehr geringe Werte der auftretenden Schwingungsamplituden von etwa 10 nm.

#### **3-D-Mikrotaster mit reduzierten Antastkräften**

In Kooperation mit dem Institut für Mikrotechnik der TU Braunschweig wurde der mikrotechnisch hergestellte 3-D-Mikrotaster durch Verwendung von Streifenmembranen hinsichtlich geringerer Antastkräfte sowie auch bezüglich Kontaktierung und Handhabung optimiert.

#### **Aufbau eines Endmaßkomparators mit Phasenverschiebungsinterferometrie**

Ein Verfahren zur automatischen Messung von Parallelenmaßen bis etwa 250 mm Länge wurde weiterentwickelt und zur Anwendung im Kalibrierbetrieb auf einen Interferenzkomparator übertragen.

#### **Diodenlaserinterferometer zur Kalibrierung einfacher Längenmessmittel**

Im Rahmen eines EU-Projektes wurde die Leistungsfähigkeit eines neu entwickelten, Umwelteinflüsse weitgehend kompensierenden Diodenlaserinterferometers zur Kalibrierung einfacher Längenmessmittel unter simulierten und realen Werkstattbedingungen getestet.

#### **Neue Strategien zur Ermittlung von Härte und Elastizität dünner Schichten**

Mit dem Nanoindentation-Verfahren kann die Härte dünner Schichten (Schichtdicke < 2 µm) am vorteilhaftesten mit einem spitzen Eindringkörper ermittelt werden, während sich zur Bestimmung des Eindringmoduls am besten ein kugelförmiger Eindringkörper eignet.

#### **Heterodynauswertung am Interferometer des Nanometerkomparators**

Die Umrüstung der Interferometeroptik am Nanometerkomparator auf das Heterodynmessverfahren erlaubt es nunmehr, erstmals Mess- und Kompensationsinterferometer gleichzeitig einzusetzen, ohne dabei erhöhte Interpolationsfehler in Kauf zu nehmen.

#### **Schnelle und modulare Messdatenerfassung**

Durch die Möglichkeit zur einfachen Einbindung von Treibern für weitere Messsysteme steht nun am Nanometerkomparator ein modulares und schnelles, auch anderweitig einsetzbares Messdatenerfassungssystem zur Verfügung, mit dem Datenraten von 95 kHz erreicht wurden.

#### **Rasterkraftmikroskopisches Messverfahren für Mikrostrukturkanten**

Zur Untersuchung von Strukturkanten wurde ein auf Schwingquarzen basierendes Rasterkraftmikroskop aufgebaut, das aufgrund seiner schlanken Bauweise gekippt werden kann und somit Messungen an sonst schwer zugänglichen Kantenbereichen ermöglicht.

#### **Charakterisierung von Testmasken zur Qualifizierung von Lithografie-Objektiven**

Die als Eingangsparameter für Simulationsrechnungen zur Bestimmung der Abbildungseigenschaften von Lithografie-Objektiven verwendeten Verhältnisse der Strich-Lückenbreiten von Gitterstrukturen auf Chrom-Testmasken wurden mit einem Metrologie-REM bestimmt.

#### **Hochauflösende Kalibrierung von Autokollimatoren**

Mit dem Winkelkomparator im Reinraumzentrum können Autokollimatoren nunmehr in feineren Messschritten mit Unsicherheiten im nrad-Bereich kalibriert werden.

#### **Ein neues Kalibrierverfahren für Rechtwinkeligkeit, Parallelität und Konizität**

Es wurde ein neues Kalibrierverfahren für Lage und Winkelbezüge vorzugsweise für zylindrische und näherungsweise zylindrische Normale entwickelt, das sich auf eine interne räumliche Referenz stützt und somit eine Verbesserung der Kalibrierunsicherheit bietet.

#### **Einführung des „Virtuellen KMG“ in die Industrie**

In einem Projekt mit Industriepartnern ist das „Virtuelle KMG“, eine Software, mit der sich Messunsicherheiten von Koordinatenmessungen „online“ ermitteln lassen, in privaten Messlaboratorien mit dem Ziel der Übertragung des Verfahrens in den DKD erprobt worden.

#### **Multilateration zur Prüfung großer KMG**

Ein in der PTB entwickeltes Verfahren, um große Koordinatenmessgeräte durch Multilateration mit einem Lasertracker hochgenau zu kalibrieren, wurde in enger Zusammenarbeit mit Industriepartnern erfolgreich umgesetzt und erprobt.

#### **Referenzalgorithmen für die Gewindemesung – abrufbar über Internet**

Es wurden Referenzalgorithmen zur Auswertung von Gewindepametern entwickelt, die über den PTB-Server abrufbar sind. Sie dienen dem Messtechniker und eignen sich zur Verifikation kommerzieller Produkte.

#### **Aufbau einer internetbasierten Infrastruktur für die Überwachung von Messgeräten**

In einem Projekt wurde ein Prototyp einer internetbasierten Software erstellt, die es insbesondere kleinen und mittleren Unternehmen erlauben soll, die notwendige messtechnische Überwachung ihrer Messgeräte durch externe Dienstleister durchführen zu lassen.

#### **Herstellung von Präzisionsbohrungen in einer Glaskeramikplatte**

Zur Verbesserung der Kalibrierung von Koordinatenmessgeräten wurde im Rahmen eines internationalen Projekts in der PTB eine 610 mm große Zerodur-Platte mit etwa 50 hochpräzisen Bohrungen mit Form- und Rauheitstoleranzen im Submikrometerbereich gefertigt.

#### **Metrologie für die Gesellschaft**

##### **Konstruktion eines Wasserkalorimeters als Primärnormal-Messeinrichtung**

Zur Darstellung der Einheit der Wasser-Energiedosis für Strahlung hoher Energie wurden ein Wasserkalorimetergehäuse, eine Detektormessvorrichtung, eine Detektorhalterung für das Wasserphantom sowie drei Detektoren entworfen.

##### **Charakterisierung der messtechnischen Eigenschaften von Kabelmessmaschinen**

Auf der Basis von Untersuchungen der Messabweichungen verschiedener Kabelmessmaschinen wurden Gerätetypen aufgrund ihres messtechnischen Wirkprinzips in Gruppen klassifiziert sowie die sich jeweils ergebenden Messbereichseinschränkungen bestimmt.

##### **Internationale Angelegenheiten**

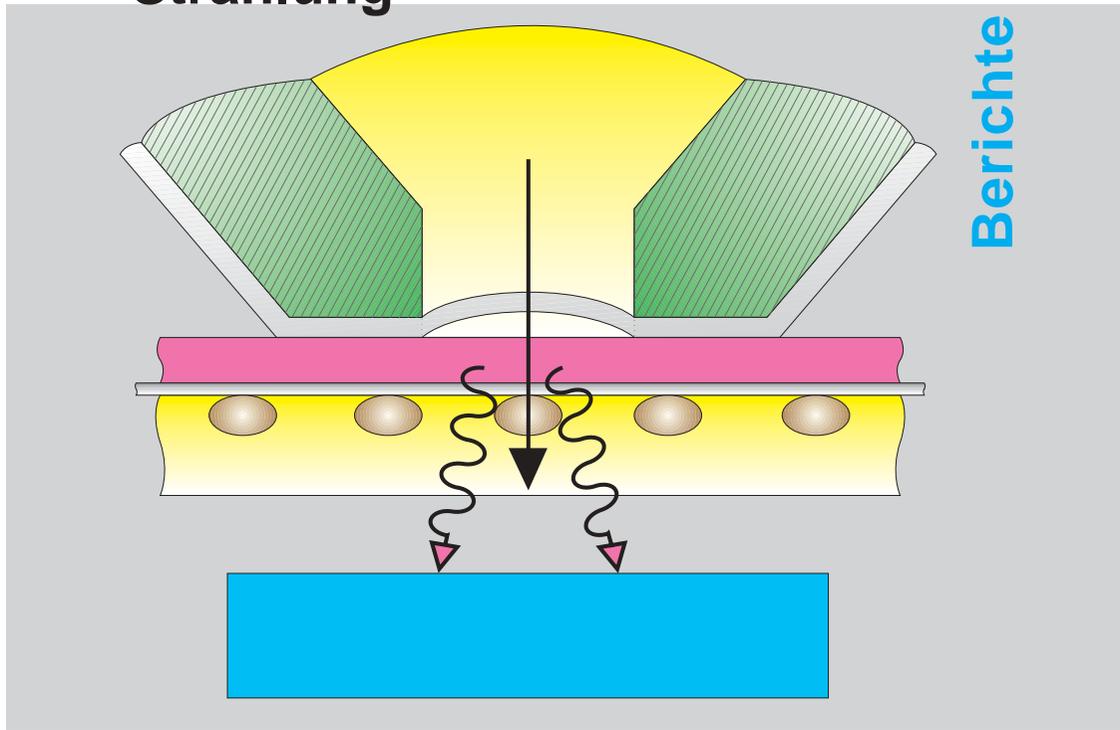
##### **Mitarbeit bei der Evaluation von QM-Systemen metrologischer Staatsinstitute**

Mitarbeiter der Abteilung waren bei der fachlichen Begutachtung der Qualitätsmanagement-Systeme von anderen metrologischen Staatsinstituten beteiligt.

##### **Internationaler Maßvergleich für Rockwell-Skalen mit Diamant-Eindringkörper**

Ein internationaler Vergleich von Härtemessverfahren für Rockwell-Skalen mit Diamant-Eindringkörper wurde abgeschlossen, bei dem sich Effekte der Geometrie der Eindringkörper und des zeitlichen Verlaufs der Prüfzyklen differenzieren ließen.

**Ionisierende  
Strahlung**



**Berichte der Abteilungen**

**Abteilung**



# Ionisierende Strahlung

Die Abteilung 6 ist bemüht, für alle Strahlungsfelder mit ionisierender Strahlung die messtechnische Infrastruktur mit entsprechender Beratung der Zielgruppen zu gewährleisten. Insbesondere auf den Gebieten der Medizintechnik und des Strahlenschutzes ist für zuverlässige Messtechnik zu sorgen, z. T. aufgrund von gesetzlichen Verpflichtungen. Der „Kundenkreis“ in Deutschland wird wie folgt abgeschätzt:

Im medizinischen Bereich: Etwa 300 000 Patienten werden jährlich strahlentherapeutisch behandelt (überwiegend mit Photonen- und Elektronenstrahlung), im Mittel wird bei jedem Einwohner einmal jährlich Röntgenstrahlung für diagnostische Zwecke verwendet. Im Strahlenschutz: Etwa 300 000 beruflich strahlenexponierte Personen werden mit Personendosimetern überwacht. 150 000 Personen sind erhöhter natürlicher Strahlenexposition ausgesetzt. In der Forschung: Universitäten und Forschungsinstitute nutzen die Kalibrier- und Messmöglichkeiten und die metrologische Kompetenz für gemeinsame Projekte.

Die wichtigste Aufgabe der Abteilung ist die Darstellung und Weitergabe der Einheiten der physikalischen Größen Dosis, Fluenz und Aktivität. Für die Größen Dosis und Fluenz bilden eine Vielzahl von sehr gut bekannten und spezifizierten Referenz-Strahlungsfeldern für die wichtigsten Strahlungsarten und -energien die Arbeitsgrundlage. Mit Primärnormal-Messeinrichtungen werden die Einheiten in diesen Feldern realisiert. Für die Größe Aktivität bilden Absolutmessverfahren zusammen mit der Bestimmung von metrologisch wichtigen Stoffdaten die Grundlage. Die Vielzahl der verschiedenen Radionuklide erfordern eine große Zahl von unterschiedlichen Messeinrichtungen.

**Titelbild**  
Mikro-Ionenstrahl-Apparatur zur Einzelteilchenbestrahlung mit einem Strahlenbündel von ca. 2  $\mu\text{m}$  Durchmesser

Die zu Beginn des Jahres 2000 erfolgte Strukturierung der Abteilung in vier Fachbereiche hat sich bewährt. Im Fachbereich *Dosimetrie für Strahlentherapie und Diagnostik* wurde jetzt eine Projektstruktur eingeführt. Durch den damit verbundenen Abbau von Laborgrenzen und die zeitliche Befristung der Projekte wird eine größere Flexibilität und Effektivität bei der Lösung der Aufgaben erwartet. Das im Jahr 2000 eingerichtete Projekt „Qualitätsmanagement in der Abteilung 6“ wurde mit dem Aufbau eines Qualitätsmanagement-Systems nach DIN ISO 17 025 erfolgreich abgeschlossen. Im Rahmen dieses Systems wurden im Jahr 2001 neun interne Audits durchgeführt.

Die atomrechtliche Genehmigung zur Stilllegung und zum Abbau von Anlagenteilen des Forschungs- und Messreaktors Braunschweig (FMRB) wurde am 2. März 2001 vom Niedersächsischen Umweltministerium erteilt. Unmittelbar nach der Genehmigungserteilung begannen die Abbauarbeiten. Der Abbau der Reaktoreinbauten wurde im Oktober beendet. Die aktivierten und kontaminierten Teile im Maschinenhaus der Anlage sind weitgehend abgebaut, ebenso wie die Anlagenteile im Installationsgeschoss des Reaktorgebäudes. Für die langfristige Zwischenlagerung der am FMRB anfallenden Abfälle wird ein internes Zwischenlager eingerichtet. Die Genehmigung dafür wurde ebenfalls mit der Stilllegungsgenehmigung vom März 2001 erteilt.

Im Folgenden wird auf die Arbeiten in den z. T. eng ineinander verzahnten Arbeitsgebieten „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

Im Rahmen des Arbeitsgebiets „Grundlagen der Metrologie“ sind für die Messung der ionisierenden Strahlung die Fundamente zu legen, die den heutigen und den für die Zukunft absehbaren Anforderungen genügen. Diese Anforderungen basieren auf der Kenntnis und Beurteilung von Wechselwirkungsmechanismen zwischen ionisierender Strahlung und Materie, insbesondere aber 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 einer biologischen Zelle insbesondere im Bereich der Chromosomen und der DNS-Moleküle den Anstoß für Strahlenschädigungen geben. Die Untersuchung der Spurstrukturen ionisierender Strahlung und der auf diese in nanometrischen Bereichen zurückzuführende Bildung von Energie- oder Ionisationsclustern stellt daher einen Bereich der Strahlenphysik dar, der neue Perspektiven für die Strahlenmetrologie eröffnen kann und eng mit der Strahlenbiologie verknüpft ist.

In den letzten Jahren wurde ein Mikro-Ionenstrahl-Messplatz aufgebaut, der es ermöglichen sollte, eine Einzelteilchenbestrahlung von Proben im Mikrometerbereich (z. B. von Zellkernen oder Halbleiterstrukturen) durchzuführen. Die Optimierung dieses Messplatzes wurde erfolgreich abgeschlossen. Die Zielvorgaben wurden weitestgehend erreicht oder übertroffen, so dass jetzt ausgewählte, gut justierbare Objekte bei einer Ortsauflösung von bis zu zwei  $\mu\text{m}$  mit einer abzählbaren Anzahl von Ionen bestrahlt werden können. Dabei kann der volle Energiebereich der beiden Beschleuniger für Protonen (0,2 MeV bis 20 MeV) und  $^4\text{He}$ -Ionen (0,4 MeV bis 28 MeV) ohne Verlust der guten Energieauflösung ( $\Delta E/E < 10^{-3}$ ) ausgenutzt werden. Die Leistungsfähigkeit der

neuen Bestrahlungsvorrichtung demonstriert das in Bild 1 gezeigte Muster der Spuren von  $^4\text{He}$ -Ionen in einem CR39-Detektor.

Bei der Untersuchung der Ionisationscluster-Erzeugung in nanometrischen Targets ist man ein gutes Stück vorangekommen. Das wichtigste Hilfsmittel für diese Untersuchungen ist zurzeit die Monte-Carlo-Methode, mit der die Struktur von Teilchenspuren in Materie simuliert werden kann. Im Rahmen einer Zusammenarbeit mit dem Weizmann Institute of Science, Rehovot/Israel, wurde die Erzeugung von Ionisationsclustern in nanometrischen Targets durch Protonen im Energiebereich zwischen 8 MeV und 30 MeV experimentell und mit der Monte-Carlo-Methode untersucht. Die Ergebnisse dienen der Weiterentwicklung des weltweit ersten Nanodosimeters, das unter Therapiebedingungen in strahlenbiologischen Experimenten in Loma Linda (USA) eingesetzt wird.

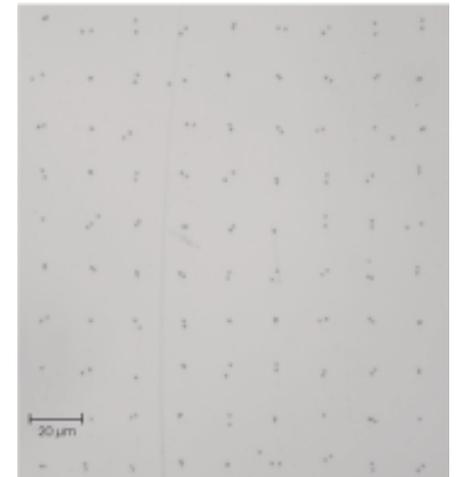


Bild 1: Spuren von  $^4\text{He}$ -Ionen mit Energien von 6 MeV in einem CR39-Spurdetektor, die durch Ätzung sichtbar gemacht wurden. Es sollten jeweils zwei  $^4\text{He}$ -Ionen in einem Rasterabstand von 20  $\mu\text{m}$  auf den Detektor treffen.

Die Bestimmung der Wirkungsquerschnitte für die neutroneninduzierte Spaltung schwerer Kerne konnte auf Energien bis 150 MeV ausgedehnt werden, nachdem die hochenergetischen Neutronenfelder am Zyklotron des National Accelerator Centre in Faure, Südafrika, mit einem in der PTB entwickelten Rückstoßprotonen-Teleskop gemessen wurden. Die neuen Daten für  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{209}\text{Bi}$  und  $^{\text{nat}}\text{Pb}$ , die alle relativ zur n-p-Streuung gemessen wurden, bestätigen nur zum Teil die zurzeit international empfohlenen Wirkungsquerschnitte.

In das Arbeitsgebiet „Grundlagen der Metrologie“ fallen die Entwicklung und Bereitstellung von Primärnormalen. Für den Bereich der sich vehement entwickelnden kardiovaskulären Brachytherapie (Bestrahlung der Koronargefäße nach Ballondilatation zur Verhinderung von In-Stent-Restenosen) stellte sich die Aufgabe, eine Primärnormal-Messeinrichtung für die Dosimetrie im Nahfeld von Brachytherapiequellen zu entwickeln. Es wurde der Prototyp einer neuartigen Multi-elektroden-Extrapolationskammer als Hauptbestandteil der Primärnormal-Messeinrichtung hergestellt. Da aber trotz aller Bemühungen die Fertigstellung der endgültigen Version dieser Kammer noch einige Zeit in Anspruch nehmen wird, hat die PTB als Zwischenschritt ein Beta-Sekundärnormal (Bild 2) mit einer Sr-90/Y-90-Flächenquelle entwickelt und einer Firma zum Nachbau überlassen. Dieses Beta-Sekundärnormal ermöglicht es, Kalibrierungen von Dosimetern im Nahfeld dieser Flächenquelle durchzuführen, die auf die PTB zurückgeführt werden können. Das Gerät dürfte in erster Linie zur Qualitätssicherung bei der Messung der Wasser-Energiedosis in der Klinik dienen, wird aber auch z. B. Entwicklern von Dosimetern für die Brachytherapie von erheblichem Nutzen sein.

### Metrologie für die Gesellschaft

Der Erhalt bzw. die Wiederherstellung der Gesundheit der Bürger auch mit Hilfe ionisierender Strahlung ist ein elementares Bedürfnis der Gesellschaft. Im Rahmen des Medizinproduktegesetzes ist Abteilung 6 zuständig für die Sicherstellung der Einheitlichkeit der Messung ionisierender Strahlung. Im Jahre 2001 haben sich die Arbeiten für die Qualitätssicherung in diesem Bereich beträchtlich

verstärkt. So sind z. B. messtechnische Kontrollen für Therapiedosimeter im Anwendungsbereich von Photonenstrahlung mit Energien ab 1,33 MeV und für Elektronenstrahlung aus Beschleunigern vorgeschrieben. In diesem Jahr haben einige Bundesländer erstmals eine private Messstelle mit der Durchführung solcher Kontrollmessungen nach dem Medizinproduktegesetz beauftragt. Es ist davon auszugehen, dass bald in ganz Deutschland Kontrollmessungen durchgeführt werden. Die PTB überprüft die Messstelle, analysiert die Messungen und berät die zuständigen Behörden, die Messstelle und Betreiber in den Kliniken. Es hat sich gezeigt, dass gerade in der Anfangsphase besonders großer Beratungsbedarf besteht. Um diesem Bedarf besser Rechnung zu tragen, wird im Frühjahr 2002 ein PTB-Seminar veranstaltet.

Das in den letzten Jahren für die Dosimetrie von Ionenstrahlen entwickelte Wasserkalorimeter wurde erstmals extern zur Bestimmung der Wasser-Energiedosis in einem gemischten n- $\gamma$ -Feld eingesetzt. Im Auftrag des Universitätsklinikums Essen wurde der Neutronentherapiestrahler am Zyklotron mit dem Kalorimeter hinter dem Kollimator gemessen. Die relative Standardunsicherheit der Kalibrierfaktoren der im Universitätsklinikum verwendeten Ionisationskammern für die Wasser-Energiedosis konnte durch diese Messungen von 4 % auf 2,5 % reduziert werden.



Bild 2: Beta-Sekundärnormal für die Brachytherapie

Messtechnik und Messverfahren zum angemessenen Schutz der Gesellschaft vor ionisierender Strahlung zur Verfügung zu stellen und einzusetzen ist eine weitere wichtige Aufgabe dieses Arbeitsgebiets. Von besonderer Bedeutung sind in diesem Zusammenhang die von der PTB durchzuführenden Bauartprüfungen an Strahlenschutz-Messgeräten für Photonenstrahlung (Orts- und Personendosimeter). Am 1. August 2001 ist die neue Strahlenschutzverordnung in Kraft getreten. Mit ihr sind neue Messgrößen für den Strahlenschutz rechtsverbindlich eingeführt worden. In Erwartung dieser Verordnung hat die PTB bereits seit Anfang des Jahres eine Reihe von Bauarten von Orts- und Personendosimetern in diesen neuen Messgrößen zugelassen.

In der Neutronendosimetrie fehlt immer noch ein aktives Personendosimeter guter Empfindlichkeit, mit dem z. B. bei CASTOR-Transporten gemessen werden kann. Die vielfältigen Erfahrungen der letzten Jahre führten jetzt dazu, ein solches Personendosimeter auf der Basis nur einer Si-Diode mit verschiedenen Konvertern und Abschirmungen zu entwickeln. Mit diesem Dosimeter ist auch Messung von Photonenstrahlung möglich. Es wurde ein Prototyp mit konventioneller Laborelektronik fertiggestellt, der die gewünschten Eigenschaften zeigt. Ein Personendosimeter mit batteriebetriebener Mikroelektronik ist in der Entwicklung.

Die neue Strahlenschutzverordnung beinhaltet explizit Regelungen zum Schutz von Mensch und Umwelt vor natürlichen Strahlungsquellen. Dadurch erhalten die von der PTB auf dem Gebiet der Umweltdosimetrie und -radioaktivität durchgeführten Arbeiten zusätzliches Gewicht. Zur Messung sehr niedriger Dosisleistungen in der Umweltdosimetrie wurde auf dem Gelände der PTB in Braunschweig im Freien eine Referenzmessfläche (Größe ca. 40 m  $\times$  40 m) mit einer mit allen notwendigen Anschlüssen versehenen Messhütte eingerichtet (Bild 3), um dauerhaft die einzelnen Komponenten der natürlichen Umgebungsstrahlung (Gamma-, Elektronen-, Myonen- und Neutronenstrahlung) mit zum Teil speziell entwickelten Detektoren (Myonendetektor, gewebeäquivalenter Proportionalzähler mit Vetosystem,  $H^*(10)$ -Kammer) zu überwachen.

Zur Messung der Strahlenexposition von Flugpersonal durch die Höhenstrahlung als Folge der galaktischen kosmischen Strahlung und von durch Eruptionen auf der Sonne („solar flares“) auf hohe Energien beschleunigten Teilchen werden von der PTB mobile Detektorsysteme betrieben. Die Systeme basieren auf gewebeäquivalenten Proportionalzählern in einem tragbaren Aluminiumkoffer. Klimassenoren, ein GPS-System und ein tragbarer Computer sind integriert.

Zur Messung aller kleinster Aktivitäten wurde im Untergrundlabor UDO mit dem Aufbau eines zweiten, verbesserten  $\gamma$ -Spektrometriessystems begonnen. Es enthält einen koaxialen HP-Germanium-Detektor aus Materialien extrem niedriger Eigenaktivität. Die Abschirmung wurde durch Blei sehr geringer Eigenaktivität und einer dickeren Lage aus Elektrolitkupfer verbessert. Erste Messungen zeigen im Vergleich zu einer 1998 aufgebauten Messeinrichtung eine Reduktion des kontinuierlichen Untergrundes um etwa einen Faktor vier.

Mit ihrer großen Radon-Referenzkammer (20 m<sup>3</sup>) legt die PTB die metrologischen Grundlagen für verlässliche und rückführbare Kalibrierungen von aktiven Messgeräten, die bei der Bestimmung der Aktivitätskonzentrationen



Bild 3: Inbetriebnahme des Freiluft-Referenzmessplatzes zur Bestimmung der einzelnen Komponenten der Umgebungsstrahlung. Vorne links IMIS-Messsonde, hinten Messhütte.

tration von Radon (Rn-222) und seinen Folgeprodukten eingesetzt werden. Der Schwerpunkt der Untersuchungen liegt heute bei dem Gleichgewichtsfaktor und dem so genannten freien, d. h. nicht an Aerosole gebundenen Anteil der Radon-Folgeprodukte. Diese Messgrößen sind für eine genaue Bestimmung der Strahlenexposition durch die Radon-Folgeprodukte besonders wichtig. Bei der Ermittlung und Bewertung von Strahlenexpositionen durch natürliche Radionuklide müssen in speziellen Fällen neben dem Radon auch das Thoron (Rn-220) und seine Folgeprodukte richtig gemessen werden. Deshalb wird zurzeit im Rahmen eines vom Bundesumweltminister geförderten Projekts ein Messsystem für Thoron und Thoron-Folgeprodukte aufgebaut.

Im Rahmen ihrer Möglichkeiten stellt die Abteilung ihre metrologische Kompetenz auch für die universitäre Forschung zur Verfügung. So werden im Rahmen einer Zusammenarbeit mit dem Institut für Optik und Quantenelektronik der *Friedrich-Schiller-Universität Jena* mittels der Thermolumineszenz-Dosimetrie (TLD)-Messtechnik Untersuchungen an laserinduzierten Plasmen durchgeführt. Die durch diese Plasmen emittierte Strahlung (Elektronen und Photonen) soll sowohl energie-, winkel- als auch teilchenart-diskriminierend bestimmt werden, wobei die Emission innerhalb sehr kurzer Zeit (weniger als ps) erfolgt und von sehr starken elektromagnetischen Störimpulsen begleitet wird. Auf TLD-Basis wurde hierzu ein Wenigkanal-Spektrometer weiter entwickelt und erfolgreich eingesetzt (Bild 4), das aus Filtern von unterschiedlichen Materialien und Dicken besteht, hinter denen die Dosis gemessen wird. Mit speziellen Entfaltungsmethoden wird die Energieverteilung der Strahlung bestimmt.

**Internationale Angelegenheiten**

Im Dezember des Jahres 2000 führte die PTB einen direkten Schlüsselvergleich ihrer Primärnormal-Messeinrichtung zur Darstellung der Einheit der Luftkerma bei <sup>60</sup>Co- und <sup>137</sup>Cs-Gammastrahlung mit dem BIPM durch. Sowohl die PTB als auch das BIPM verwendeten für diesen Zweck Graphit-Hohlraum-Ionisationskammern. Die Ergebnisse zeigen, dass die Werte für die Luftkerma der PTB um etwa 0,8 % höher liegen als die des BIPM. Die

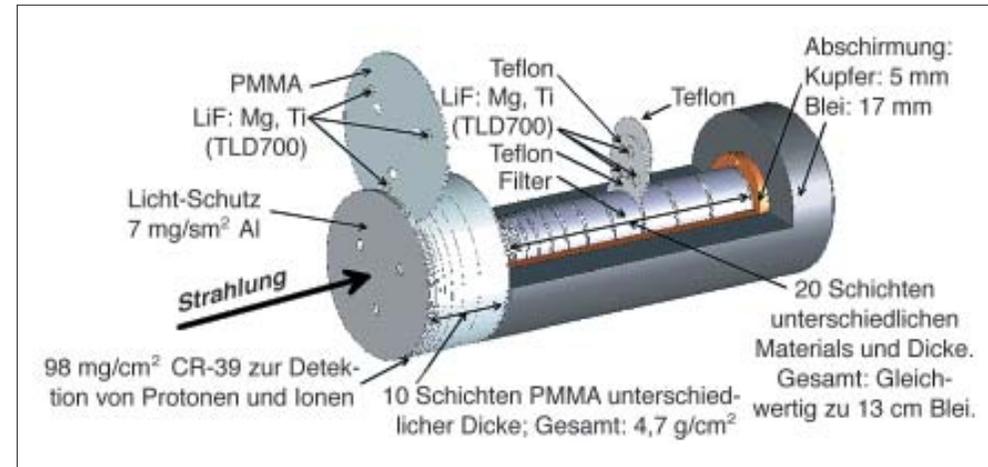
Ursachen für diesen erheblichen Unterschied liegen vor allem in den unterschiedlichen Verfahren zur Bestimmung des so genannten Wandkorrektionsfaktors. Die PTB verwendet hierzu ein spezielles Berechnungsverfahren mit Hilfe der Monte-Carlo-Methode, die der älteren, experimentellen Methode des BIPM überlegen ist. Die PTB hat sich entschlossen, die neuen Luftkerma werte sowohl für <sup>60</sup>Co als auch für <sup>137</sup>Cs-Gammastrahlung bereits zum 1. Januar 2002 einzuführen.

Im Rahmen eines internationalen CCRI-Schlüsselvergleichs zur Bestimmung der Fluenz monoenergetischer Neutronen wurden Messungen in vier verschiedenen Neutronenfeldern durchgeführt. Es beteiligten sich sieben Arbeitsgruppen aus Europa, den USA, Japan, Russland und China, die entweder ihre Primärnormal-Messeinrichtungen oder auf diese rückführbare Transferinstrumente einsetzten.

In den Jahren 1999 und 2000 wurden erstmals zwischen dem VNIIM (Russland) und der PTB Vergleichsmessungen der nationalen Primärnormal-Messeinrichtungen zur Darstellung und Weitergabe der Einheit der Energiedosis von Betastrahlung in Gewebe durchgeführt. Die Auswertungen dieser Messungen konnten jetzt abgeschlossen werden. Die Übereinstimmung der ermittelten Kalibrierfaktoren einer als Transfer-Normal benutzten Flach-Ionisationskammer ist besser als 1 % für die Nuklide <sup>90</sup>Sr/<sup>90</sup>Y und <sup>204</sup>Tl und 2 % für <sup>147</sup>Pm. Diese Ergebnisse reihen sich gut in die Resultate früherer internationaler Vergleichsmessungen in Ost und West ein.

Um Anwendern den Zugang zu Untergrundlaboratorien wie dem oben erwähnten UDO-Labor zu erleichtern sowie die Entwicklung neuer Messmethoden und die Suche nach weiteren, insbesondere industriellen, Anwendungen untergrundarmer  $\gamma$ -Spektrometrie-systeme gezielt zu fördern, haben sich vor kurzem acht europäische Institutionen, die über Untergrundlaboratorien verfügen, unter dem Namen „CELLAR“ (Collaboration of European Low-level Underground Laboratories) zu einem „Netzwerk“ zusammengeschlossen.

Bild 4: Wenigkanal-Spektrometer zur Messung von laserinduzierten Elektronen- und Photonspektren



## In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

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

### Grundlagen der Metrologie

#### Erzeugung von Ionisationsclustern in nanometrischen Bereichen

Für nanometrische Targets ist die Erzeugung von Ionisationsclustern in gewebe-äquivalentem Gas auf Propanbasis äquivalent zu der in Wasser.

#### Energieabhängigkeit des W-Wertes von Protonen in Wasser

Die Energieabhängigkeit des W-Wertes von Protonen zwischen 1 keV und 100 keV wurde zum ersten Mal in Wasserdampf gemessen.

#### Messung doppelt-differentieller Elektronen-Wirkungsquerschnitte für Dimethyl-Ether (DME)

Erste Grundlage für die Monte-Carlo-Untersuchung von Dosimetern auf der Basis von Dimethyl-Ether (DME) geschaffen: Der doppelt-differentielle Elektronen-Wirkungsquerschnitt für DME wurde zum ersten Mal im Primärelektronen-Energiebereich zwischen 100 eV und 2 keV gemessen.

#### Verwendung eines Flachdetektors im Wasserkalorimeter

Die Verwendung des Flachdetektors ermöglicht die präzisere Berücksichtigung von Wärmeleitungseinflüssen bei der kalorimetrischen Darstellung der Einheit der Wasser-Energiedosis.

#### Sekundärnormal für die Brachytherapie

Die PTB bietet für die kardiovaskuläre Brachytherapie mit  $\beta$ -Strahlenquellen die Kalibrierung von Sekundärnormalen in der Messgröße Wasser-Energiedosis an. Die Sekundärnormale sind baugleich mit Teilen einer PTB-Normal-Messeinrichtung und werden in Lizenz hergestellt.

#### Mikro-Ionenstrahl für hochenergetische Protonen und $^4\text{He}$ -Ionen

Die Optimierung der Eigenschaften des in den letzten Jahren entwickelten Mikro-Ionenstrahls konnte erfolgreich abgeschlossen werden. Ausgewählte Objekte können jetzt mit einer abzählbaren Anzahl von Ionen und Ortsauflösung von  $2 \mu\text{m}$  bestrahlt werden, wobei der weite Energiebereich der beiden Beschleuniger voll genutzt werden kann.

#### Messung der räumlichen Ionisationsdichteverteilung von Schwerionen in gewebeähnlichem Gas

Die Teilchenspurkammer OPAC wurde erstmals an der GSI in Darmstadt eingesetzt, um die Spuren von hochenergetischen Argon- und Kohlenstoffionen mit Ortsauflösungen im sub-mm-Bereich sichtbar zu machen. Diese Untersuchungen werden im Rahmen einer von der GSI und der PTB geförderten Doktorarbeit weitergeführt.

#### Metrologie hochenergetischer Neutronen im Energiebereich von 60 MeV bis 200 MeV

Nach dem UCL-Zyklotron in Louvain-la-Neuve konnte nun das NAC-Zyklotron in Faure, Südafrika, genutzt werden, um Kalibrierfelder mit Neutronenenergien bis 150 MeV zu erzeugen. Für die präzise Bestimmung der Neutronenfluenz wurde ein neues Rückstoßprotonen-Teleskop entwickelt und erfolgreich eingesetzt.

#### Wirkungsquerschnitte für die Spaltung schwerer Atomkerne durch hochenergetische Neutronen

In den hochenergetischen Neutronenfeldern an den Beschleunigern in Louvain-la-Neuve und Faure konnten die Spaltquerschnitte für  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{209}\text{Bi}$  und  $^{\text{nat}}\text{Pb}$  gemessen werden. Dabei wurden alle Wirkungsquerschnitte relativ zu dem gut bekannten differentiellen n-p-Streuquerschnitt bestimmt.

#### Messung von Neutronen-Wirkungsquerschnitten im Energiebereich 8 MeV bis 14 MeV

Streu- und Aktivierungswirkungsquerschnitte für Silizium im Neutronenenergiebereich von 8 MeV bis 14 MeV wurden dokumentiert und auf der Nuclear Data Conference im Oktober d. J. in Japan vorgestellt. Neue experimentelle Daten für Stickstoff, Titan, Kupfer und Zink liegen bereits vor und werden analysiert.

#### Metrologie für die Gesellschaft

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

In der PTB wird, vom BMU mit 320 000 DM gefördert, ein Messsystem für Thoron und Thoron-Folgeprodukte aufgebaut.

#### Die neue Strahlenschutzverordnung: Gibt es schon eichfähige Dosimeter für die „neuen“ Messgrößen?

Seit 1. August 2001 gilt in Deutschland eine neue Strahlenschutzverordnung, mit der neue Messgrößen in der Strahlenschutzdosimetrie verbindlich eingeführt wurden. Die PTB führt seit 1. Januar 2001 Bauartprüfungen nur für Dosimeter für die neuen Messgrößen durch. Inzwischen sind zehn Ortsdosimeter und neun Personendosimeter für die entsprechenden Messgrößen zugelassen worden.

#### Messung von laserinduzierten Elektronen- und Photonenpektren

Ein Wenigkanal-Spektrometer auf Basis der TLD-Messtechnik wurde (weiter)entwickelt und im Rahmen einer Zusammenarbeit mit der Friedrich-Schiller-Universität Jena zur energie-, winkel- und teilchenartdiskriminierenden Messung der von laserinduzierten Plasmen innerhalb sehr kurzer Zeit (weniger als ps) emittierten Strahlungsfelder eingesetzt.

#### Referenz-Messfläche zur Überwachung der Umgebungsstrahlung

In der PTB wurde eine Referenzmessfläche zur dauerhaften Überwachung der verschiedenen Komponenten der natürlichen Umgebungsstrahlung mittels spezieller Teilchendetektoren eingerichtet.

#### Aufbau eines extrem untergrundarmen $\gamma$ -Spektrometriesystems im Untergrundlaboratorium UDO

Mit dem Aufbau eines zweiten, verbesserten  $\gamma$ -Spektrometriesystems im UDO-Labor wurde begonnen. Erste Messungen zeigen einen deutlich reduzierten Untergrund gegenüber dem seit 1998 bestehenden System.

#### Mobiler Messkoffer zur Messung der Strahlenbelastung in Flughöhen

Zur Messung der Strahlenexposition von Flugpersonal durch die Höhenstrahlung werden von der PTB mobile Detektorsysteme betrieben. Die Systeme basieren auf gewebe-äquivalenten Proportionalzählern (TEPC: tissue equivalent proportional counter,  $\varnothing 56 \text{ mm}$ ).

#### Elektronisches Dosimeter für Photonen- und Neutronenstrahlung

Das Laborsystem des elektronischen Dosimeters für Neutronen, das auf der Auswertung

des Pulshöhenspektrums einer Si-Diode beruht, konnte derart erweitert werden, dass auch die Äquivalentdosis für Photonen im Energiebereich zwischen 70 keV und 7 MeV angezeigt werden kann. Der Prototyp eines tragbaren Dosimeters für die Personendosimetrie in gemischten Feldern ist in Entwicklung.

#### Bestimmung der Wasser-Energiedosis im gemischten Neutronen-Photonen-Feld des Universitätsklinikums in Essen

Das transportable Wasser-Kalorimeter, ein Normalmessgerät der PTB, wurde an der Beschleunigeranlage des Klinikums in Essen eingesetzt, um die Energiedosis des gemischten Strahlungsfeldes hinter einem Holzkolimator in Gewebe zu bestimmen. Mit der direkten Kalibrierung vor Ort in Einheiten der Wasser-Energiedosis kann die Energiedosis in Gewebe mit einer Unsicherheit von 2,5 % bestimmt werden.

#### Jährliche Vergleichsbestrahlungen amtlicher Neutronen-Personendosimeter

Die jährliche Vergleichsbestrahlung von amtlichen Personendosimetern in den Radionuklid-Neutronenfeldern der PTB hat wieder einmal bestätigt, dass die fünf Messstellen in Deutschland die Anzeigen der Albedodosimeter im Rahmen der zulässigen Abweichungen zuverlässig auswerten.

#### Kalibrierung von Bonner-Kugel-Spektrometern in den Neutronenfeldern der PTB

Das Ansprechvermögen der neuen Bonner-Kugel-Neutronenspektrometer des Los Alamos National Laboratory (LANL) und des CERN wurden mit monoenergetischen Neutronen und in dem Feld einer  $^{252}\text{Cf}$ -Quelle in der großen Messhalle der Beschleunigeranlage kalibriert. Beide Systeme werden als Primärmesseinrichtung zur Bestimmung der spektralen Fluenz und Dosis-Referenzwerte an Arbeitsplätzen und in Kalibrierfeldern eingesetzt.

#### Internationale Angelegenheiten

##### Internationale Fachtagung von Radionuklid-Metrologen, ICRM2001

Der Fachbereich 6.1 *Radioaktivität* der PTB organisierte im Berichtsjahr die „13<sup>th</sup> International Conference on Radionuclide Metrology and its Applications“ ICRM2001 (14.5. bis 17.5.) mit 130 Teilnehmern aus 30 Ländern.

**BIPM-Schlüsselvergleich mit Konsequenzen**

Im Zusammenhang mit einem direkten Schlüsselvergleich der PTB-Primärnormal-Messeinrichtung zur Darstellung der Einheit der Luftkerma bei <sup>60</sup>Co- und <sup>137</sup>Cs-Gammastrahlung mit der des BIPM wird zum 1. Januar 2002 die PTB um knapp 1 % höhere Luftkermawerte einführen.

**„CELLAR“, ein europäisches Netzwerk von Untergrundlaboratorien**

Die PTB unterzeichnete ein Kooperationsabkommen für ein Netzwerk europäischer Untergrundlaboratorien („CELLAR“) zur Messung sehr niedriger Radioaktivitäten und Dosisleistungen.

**Vergleichsmessungen auf dem Gebiet der Betadosimetrie**

Der Vergleich der Primärnormal-Messeinrichtungen des VNIIM, St. Petersburg und der PTB Braunschweig für die Darstellung der Einheit der Energiedosisleistung von Betastrahlung in Gewebe ergab eine Übereinstimmung von besser 1 % für Sr-90/Y-90- und Tl-204- und 2 % für Pm-147-Betastrahlung und reiht sich damit hervorragend ein in die Resultate früherer internationaler Vergleichsmessungen in Ost und West.

**CCRI-Vergleichsmessungen in der PTB**

Vergleichsmessungen zur Bestimmung der Fluenz in monoenergetischen Neutronenfeldern, die von der Sektion III des Consultative Committee for Ionising Radiation (CCRI) initiiert und durchgeführt werden, wurden erstmals im gleichen Neutronenfeld durchgeführt. Dafür setzten im März d. J. sieben Laboratorien aus aller Welt ihre Primärmessgeräte oder kalibrierte Transferinstrumente in vier verschiedenen Neutronenfeldern ein, die an der Beschleunigeranlage der PTB erzeugt wurden.

**Tagung der Europäischen Strahlendosimetrie-Gruppe EURADOS in der PTB**

Die diesjährige EURADOS-Tagung führte im Januar etwa 50 Wissenschaftler in der PTB zusammen, um in verschiedenen Arbeitsgruppen über laufende und zukünftige Projekte zu diskutieren, z. B. über die Harmonisierung der Messverfahren für die Personendosimetrie, die Frühwarnsysteme der Umgebungüberwachung, die Dosimetrie des Flugpersonals etc.

**Weitere Informationen**

**Stilllegung des Forschungs- und Messreaktors Braunschweig (FMRB)**

Die atomrechtliche Genehmigung zur Stilllegung und zum Abbau von Anlagen teilen des FMRB ist der PTB am 2.3.2001 vom Niedersächsischen Umweltministerium erteilt worden. Mit den Abbauarbeiten wurde begonnen. U. a. wurde der Abbau der Reaktoreinbauten abgeschlossen. Mit der Einrichtung eines internen Zwischenlagers zur langfristigen Zwischenlagerung radioaktiver Abfälle des FMRB wurde begonnen.

**Multiparameter-Datenaufnahmesystem MPA-3**

Ein seit mehr als 25 Jahren genutztes Datenaufnahmesystem konnte jetzt durch ein modernes Messsystem auf PC-Basis ersetzt werden, das die hervorragenden Echtzeiteigenschaften des alten PDP11-CAMAC-Systems sogar übertrifft. Das neue Pulshöhenanalyse-System kann vier (bis max. 16) Parameter mit hohem Datendurchsatz gleichzeitig analysieren und bietet vielfältige Möglichkeiten zur Auswertung während oder nach der Aufzeichnung der Daten.

# Temperatur und Synchrotronstrahlung

Seite 374 Ministerialblatt des Bundesministers für Wirtschaft Nr. 19

**Bekanntmachungen**

**Abkommen über die Übernahme der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt, Berlin-Charlottenburg, auf die Bundesrepublik Deutschland und ihre Vereinigung mit der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt in Braunschweig**  
(Bundesanzeiger Nr. 188 vom 30. September 1953)

Zwischen der Bundesrepublik Deutschland, vertreten durch den Bundesminister für Wirtschaft, und dem Lande Berlin, vertreten durch den Senator für Finanzen, wird folgendes Abkommen geschlossen.

§ 1  
Die Physikalisch-Technische Reichsanstalt (PTR), Berlin-Charlottenburg, wird der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt, Braunschweig, die zum Dienstbereich des Bundesministers für Wirtschaft gehört, als Physikalisch-Technische Bundesanstalt — Institut Berlin — angeschlossen.

§ 2  
Die Bundesanstalt hat ihren Sitz in Braunschweig und in Berlin.

§ 3  
Das Land Berlin erkennt an, daß die Verwaltung der in Berlin gelegenen, im Eigentum des Deutschen Reichs stehenden Grundstücke und Einrichtungen der ehemaligen Physikalisch-Technischen Reichsanstalt, Berlin-Charlottenburg, dem Land zusteht.

§ 4  
(1) Das Institut Berlin der Bundesanstalt übernimmt die Pflichten für die Berliner Wirtschaft, Technik und Verwaltung auf dem Arbeitsgebiet der Bundesanstalt, soweit die erforderlichen Einrichtungen in Berlin vorhanden sind.  
(2) Das Institut Berlin werden auch künftige Forschungsarbeiten übertragen. Ebenso nimmt das Institut Berlin an den internationalen Aufgaben der Bundesanstalt teil.

§ 5  
Der Senat von Berlin bedient sich der Bundesanstalt als technischer Oberbehörde.

§ 6  
(1) Die Bundesregierung gewährleistet, daß die beim Inkrafttreten dieses Abkommens vorhandenen Einrichtungen und der personelle Bestand der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt (mit Ausschlüssen in Berlin erhalten bleiben, und daß das Institut Berlin stets an der Entwicklung der Bundesanstalt anwesend beteiligt bleibt,

(2) Sollte sich aus der künftigen Entwicklung der Verhältnisse die Notwendigkeit zu Maßnahmen ergeben, durch die der derzeitige sachliche und personelle Stand des Instituts Berlin geändert oder beeinträchtigt wird, so ist vor einer Entscheidung über solche Maßnahmen dem Senat von Berlin Mitteilung zu machen und nach Möglichkeit Einvernehmen mit ihm herbeizuführen. Läuft sich ein Einvernehmen nicht erzielen, so legt der Bundesminister für Wirtschaft den Beschluß des Senats von Berlin den für die Entscheidung zuständigen Stellen des Bundes vor. Auf diese Weise ist insbesondere zu verfahren, wenn es sich um den Haushalt handelt, soweit er das Institut Berlin betrifft.

§ 7  
Der gegenwärtige Leiter der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt übernimmt die Leitung des Institutes Berlin und ist ständiger Vertreter des Präsidenten der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt im Bereich des Institutes Berlin. Er ist Mitglied der Vollversammlung der Bundesanstalt.

§ 8  
In das Kuratorium der Bundesanstalt werden

1. ein Vertreter des Senats von Berlin,
2. zwei weitere vom Senat von Berlin zu benennende Persönlichkeiten aus Wissenschaft und Wirtschaft,
3. der Leiter des Instituts Berlin der Bundesanstalt und sein ständiger Stellvertreter

als Mitglieder aufgenommen.

§ 9  
(1) Dieses Abkommen tritt mit dem auf seine Veröffentlichung im Bundesanzeiger und im Amtsblatt für Berlin folgenden Tage in Kraft. Die Veröffentlichung ist in beiden Verkündungsblättern gleichzeitig vorzunehmen.  
(2) Unabänderlich wird die Physikalisch-Technische Reichsanstalt mit Wirkung vom 1. April 1953 nach Maßgabe des Haushaltsplans des Bundesministers für Wirtschaft — Kap. 0503a — für das Rechnungsjahr 1953 übernommen.

Berlin, den 15. September 1953 Bonn, den 21. September 1953

Der Senator für Finanzen Der Bundesminister für Wirtschaft  
Dr. Haas Dr. Ludwig Richard

BWMBI 1953 S. 374

**Physikalisch Technische Bundesanstalt**

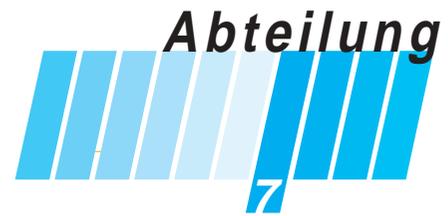
---

Memorandum  
Die PTB nach der deutschen Vereinigung

---

März 1991

**PTB**



# Temperatur und Synchrotronstrahlung

## Konzentration der PTB in Berlin auf die Standorte Charlottenburg und Adlershof

Mit der deutschen Vereinigung wurden 1990 Teile des Bereichs Messwesen des Amtes für Standardisierung, Messwesen und Warenprüfung (ASMW) der DDR in die PTB integriert. Zug um Zug wurde der PTB auch das ehemalige ASMW-Gelände in Berlin-Friedrichshagen übertragen (Bild 1).



Bild 1: Liegenschaft der PTB in Friedrichshagen. Am 18. Oktober 2001 schlossen Bundesvermögensamt und PTB eine Verwaltungsvereinbarung über die Übertragung der Liegenschaft in das allgemeine Grundvermögen des Bundes.

**Titelbild**  
Abkommen über die Übernahme der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt, Berlin-Charlottenburg, durch die Bundesrepublik Deutschland und ihre Vereinigung mit der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt in Braunschweig (Bundesanzeiger Nr. 188 vom 30. September 1953) und Memorandum *Die PTB nach der deutschen Vereinigung vom März 1991*, verfasst vom damaligen Präsidenten Prof. Dieter Kind

Schließlich trat für die erweiterte PTB vor zehn Jahren, am 5. Oktober 1991, eine neue Organisationsstruktur in Kraft, die der damalige Präsident Dieter Kind mit einem Memorandum *Die PTB nach der deutschen Vereinigung* im März desselben Jahres vorgeschlagen hatte (Titelbild). Insbesondere für den Berliner Teil der PTB am Traditionsstandort Charlottenburg und in Friedrichshagen brachte dies erhebliche Veränderungen, eröffnete aber auch neue Perspektiven.

Längerfristig sah das Memorandum eine Neuverteilung von Aufgaben und Ressourcen auf die Standorte Braunschweig und Berlin-Charlottenburg vor. Damit verbunden war der Ausbau des Instituts Berlin für die Unterbringung von etwa 400 Beschäftigten (320 Planstellen und 80 sonstige Beschäftigte, insbesondere Drittmittelmitarbeiter und Auszubildende). Im Jahre 1953 war die Physikalisch-Technische Reichsanstalt in Charlottenburg als Institut Berlin mit der PTB in Braunschweig vereinigt worden (Titelbild).

Die Standortkonzentration war im Berichtsjahr so weit fortgeschritten, dass die Vorbereitungen getroffen werden konnten, die Liegenschaft in Friedrichshagen an die Stiftung Preußischer Kulturbesitz zu übertragen, die sie zum Aufbau von Ausstellungen in Verbindung mit der Neugestaltung der Berliner Museumsinsel nutzen will. Bereits im Oktober 2001 begann die Stiftung in Friedrichshagen mit einem ersten Projekt des Vorderasiatischen Museums, dem Wiederaufbau des Eingangsportals des Tempelpalastes von Guzana/Tel Halaf.

Die zugehörige Verwaltungsvereinbarung über die Übertragung der Friedrichshagener Liegenschaft in das allgemeine Grundvermögen des Bundes wurde zwischen dem Bundesvermögensamt und der PTB am 18. Oktober 2001 abgeschlossen. In Verbindung damit wurde eine zweite Vereinbarung über die vorübergehende Rückübertragung eines

kleinen Teils der Liegenschaft an die PTB unterzeichnet. Diesen Teil der Liegenschaft wird das Institut Berlin nutzen, bis der Ausbau am Standort Charlottenburg abgeschlossen sein wird.

Mit der Veranstaltung *Die PTB – 10 Jahre nach der deutschen Vereinigung* am 2. Oktober 2001 in Friedrichshagen haben sich die Angehörigen der PTB vom Standort Friedrichshagen verabschiedet. Die Abschiedsveranstaltung markiert das Ende des rund 50-jährigen Zeitabschnittes nach dem II. Weltkrieg, dem sich Professor Dieter Kind in dem Festvortrag *Von Weida nach Friedrichshagen: Die Geschichte der staatlichen Metrologie der DDR* widmete. In seinem Grußwort für den Bundesminister für Wirtschaft und Technologie würdigte Ministerialdirigent Hans-Peter Lorenzen (Bild 2) die gelungene Standortkonzentration und hob besonders hervor, dass mit dem Abschied aus Friedrichshagen die PTB keineswegs ihr Engagement im Osten Berlins aufgibt. Das Synchrotronstrahlungslabor der PTB bei BESSY II trage wesentlich zur Attraktivität des Wissenschafts- und Wirtschaftsstandortes in Adlershof bei; die dort erreichte Kombination von befruchtendem wissenschaftlichem Umfeld und Kundennähe sei beispielgebend und Grundlage für den weiteren Ausbau des Standortes Adlershof der PTB.



Bild 2: Ministerialdirigent Hans-Peter Lorenzen bei seinen Grußworten für den Bundesminister für Wirtschaft und Technologie auf der Abschiedsveranstaltung in Berlin-Friedrichshagen: Mit der Schließung des Standortes Friedrichshagen gebe die PTB keineswegs ihr Engagement im Osten Berlins auf, vielmehr sei ein umfassender Ausbau am Wissenschafts- und Wirtschaftsstandort in Adlershof vorbereitet.

## Ausbau der Metrologie mit Synchrotronstrahlung am Wissenschafts- und Wirtschaftsstandort Berlin-Adlershof

Um die künftigen Anforderungen auf dem Gebiet der Photonenmetrologie erfüllen zu können, wurden im Berichtsjahr die Vorbereitungen zur Errichtung eines Niederenergie-Kompaktsterrings für die UV- und EUV-Metrologie und -Technologie so weit voran gebracht, dass der Bauantrag fertiggestellt werden konnte (Bild 3).



Bild 3: Das geplante Laborgebäude für die UV- und EUV-Metrologie und -Technologie mit einem Niederenergie-Kompaktsterring, integriert in die BESSY-II-Anlage am Wissenschafts- und Wirtschaftsstandort Berlin-Adlershof

Der Speicherring mit durchstimmbarer Elektronenenergie von 200 MeV bis 600 MeV soll – integriert in die BESSY-II-Anlage am Wissenschafts- und Wirtschaftsstandort in Berlin-Adlershof – in dem Vierjahreszeitraum von 2004 bis 2007 entstehen. In begrenztem Umfang – soweit mit der metrologischen Zweckbestimmung verträglich – soll der Niederenergie-Kompaktsterring auch Nutzern der Grundlagenforschung offen stehen, die auf Synchrotronstrahlung bei niedrigen Photonenenergien angewiesen sind.

Die Pläne der PTB entsprechen dem seit vielen Jahren erkennbaren Bedarf in Europa. Auf seiner Sitzung am 16. März 2001 hat das Kuratorium der PTB die Pläne daher nachhaltig unterstützt. Am 2. April 2001 behandelte der Aufsichtsrat der BESSY GmbH die Baumaßnahme und sprach sich mit Nachdruck für eine schnelle Verwirklichung aus. Die BESSY GmbH hat daraufhin mit Schreiben vom 9. August 2001 im Rahmen ihres Erbaurechtsvertrags mit der WISTA GmbH das Grundstück bereit gestellt.

Strategisches Ziel von BESSY GmbH und PTB ist die Schaffung eines Zentrums mit sich einander optimal ergänzenden Synchrotronstrahlungsquellen für Grundlagenforschung, Metrologie und Technologieentwicklung. Die BESSY GmbH unternimmt derzeit große Anstrengungen, um eine Entscheidung über den Aufbau eines Freie-Elektronen-Lasers herbeizuführen, der neben BESSY II und dem Kompaktspicherring betrieben werden soll.

Die PTB und ihre Kunden werden nachhaltig von den Synergieeffekten in Adlershof profitieren. Dort sind bereits die naturwissenschaftlichen Institute der Humboldt-Universität zu Berlin sowie zwölf außeruniversitäre Forschungseinrichtungen neben der PTB angesiedelt; darunter das *Max-Born-Institut* (MBI), die *Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt* (DLR), das *Hahn-Meitner-Institut* (HMI) und die *Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung* (BAM). Dazu kommen insgesamt über 350 technologieorientierte Unternehmen.

#### UV- und EUV-Metrologie für die Industrie – Bundesminister Werner Müller im Synchrotronstrahlungslabor der PTB bei BESSY II

Am 3. Juli 2001 besuchte Bundeswirtschaftsminister Dr. Werner Müller das Synchrotronstrahlungslabor der PTB bei BESSY, um sich über die Vorbereitungen zur Errichtung des Niederenergie-Kompaktspicherrings zu informieren (s. Nachrichten des Jahres S. 24).

Zentrales Thema des Besuchs waren die Beiträge der Abteilung zur Entwicklung der Halbleiterlithographie. Der UV- und EUV-Spektralbereich gewinnt weltweit wachsende Bedeutung zur Realisierung immer kleinerer Halbleiterstrukturen. Auch die deutsche Industrie unternimmt gemeinsam mit europäischen Partnern große Anstrengungen, um Halbleiterstrukturen mit Breiten von zunächst 70 nm und – entsprechend den Vorgaben der „International Technology Roadmap for Semiconductors“ – um 2010 von etwa 35 nm zu erreichen. Als aussichtsreichstes zukünftiges Verfahren gilt die Extrem-UV-Lithographie (EUVL), bei der Strahlung mit einer Wellenlänge von 13 nm eingesetzt wird.

Bei der Entwicklung der für die Lithographie erforderlichen komplexen UV- und EUV-

Messtechnik spielen die Arbeiten der Abteilung eine zentrale Rolle. Zahlreiche Kooperationsvereinbarungen mit der deutschen Industrie unterstreichen die Bedeutung dieses neuen Bereichs der Messtechnik und lassen auch das Vertrauen erkennen, das die deutsche Industrie auf die Kompetenz der PTB auf diesem Gebiet setzt.

Parallel zu Messungen des Reflexionsgrades von mehr als 700 Mo/Si-Multilayerspiegeln für die EUV-Lithographie wurde im Berichtsjahr im Rahmen des BMWi-Programms „Leistungssteigerung Infrastruktur“ mit dem Aufbau eines neuen Reflektometers für die Charakterisierung von EUVL-Spiegeln mit bis zu 55 cm Durchmesser begonnen, das ab 2002 weltweit einmalige Messmöglichkeit bietet wird. Für Multilayerspiegel mit einfachen Mo/Si-Doppelschichten hat sich ein Reflexionsgrad von rund 69 % als obere Grenze erwiesen. Probleme bestehen insbesondere bei höheren Temperaturen durch Interdiffusion von Mo und Si. Es wird deshalb versucht, die Diffusion durch zusätzliche Zwischenschichten zu unterdrücken (Bild 4).

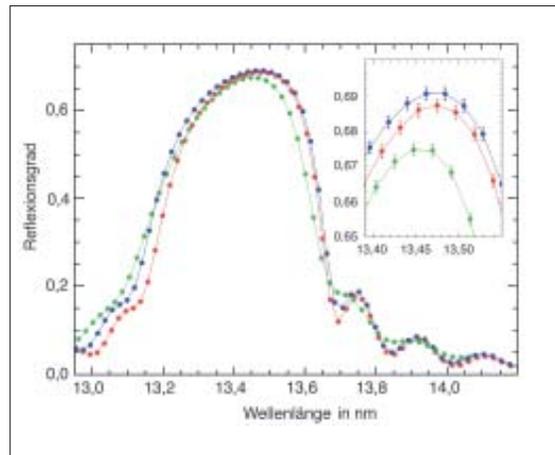


Bild 4: Spektraler Reflexionsgrad von EUVL-Spiegeln mit einfachem Mo/Si-Schichtaufbau (rot), einseitiger Diffusionsbarriere Mo/Si/W (grün) und doppelseitiger Diffusionsbarriere Mo/B4C/Si/C (blau). Der Unterschied im Reflexionsgrad zwischen dem einfachen Mo/Si-Schichtsystem und der optimierten Diffusionsbarriere ist mit der bisher erreichten Messunsicherheit von 0,25 % gerade signifikant nachweisbar. (Kooperationspartner Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik (IWS), Dresden).

Umfangreiche Untersuchungen unter verschiedenen Vakuumbedingungen an einem neu aufgebauten Messplatz mit fokussierter Synchrotronstrahlung dienten dem Verständnis der Alterung von EUVL-Optiken unter intensiver EUV-Bestrahlung. Zur weiteren Entwicklung der Systemmesstechnik für EUVL-Projektionsoptiken wurde im Juli 2001 ein Optiksistem für Waferstrukturierung des Industriepartners Carl Zeiss aufgebaut. Dieses so genannte Micro Exposure Tool mit zwei hochpräzisen asphärischen Spiegeln soll Strukturbreiten von 30 nm erzeugen können. Erste Messungen mit 13-nm-Strahlung zur Bestimmung der optischen Eigenschaften des Systems konnten bereits durchgeführt werden (Bild 5).



Bild 5: Rundgang durch das Synchrotronstrahlungslabor der PTB bei BESSY. Prof. Wende erläutert Minister Müller die Entwicklungsarbeiten zur EUV-Lithographie, die die PTB in enger Kooperation mit der deutschen Industrie und deren europäischen Partnern bearbeitet. Das Gerät ist die Vorstufe einer EUV-lithographischen Belichtungsmaschine für Strahlung der Wellenlänge 13 nm (angestrebte Auflösung 30 nm).

Mit der erreichten Kompetenz konnte die Abteilung u. a. auch eine zentrale Aufgabe in dem neuen, vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten OpTecBB-Netzwerk zu optischen Technologien im 21. Jahrhundert übernehmen, dem derzeit bereits mehr als 80 Unternehmen und wissenschaftliche Einrichtungen in Berlin und Brandenburg angehören. Nicht nur auf regionaler, sondern auch auf internationaler Ebene hat die Abteilung Lenkungsarbeiten auf dem Gebiet der Photonometrie übernommen. Beispiels-

weise koordiniert die Abteilung (Fachbereich 7.1) im Rahmen des Projekts EUNETE (Extreme UV Research Network for Excellence) europaweit die Metrologie für die EUV-Lithographie mit zurzeit acht beteiligten Instituten. Dieses Projekt soll aus der im Juli 2001 erfolgten siebten Ausschreibung der Europäischen Kommission im IST-Programm (Information Society Technologies) mit erwarteten 10 Mio. Euro gefördert werden.

#### Fortschritte bei der Entwicklung einer einheitlichen Radiometrie optischer und ionisierender elektromagnetischer Strahlung

Im Berichtsjahr hat die Abteilung ihre Ressourcen verstärkt darauf konzentriert, eine einheitliche Radiometrie vom fernen IR (Wellenlänge 10  $\mu\text{m}$ , Photonenergie etwa 0,1 eV) bis in den Bereich harter Röntgenstrahlung (Photonenergie etwa 100 keV) zu entwickeln. Dazu wurden die primären Strahlernormale Hohlraumstrahler und Elektronenspeicherring sowie die primären Empfänger normale Kryoradiometer (elektrisch kalibrierte Tieftemperatur-Hohlraumempfänger) und Freiluftionisationskammer weiter optimiert und vor allem die radiometrische Instrumentierung weiter ausgebaut, um die Normale in neuen Spektralbereichen einzusetzen.

Auf dem Gebiet der empfangergestützten Radiometrie wird die spektrale Empfindlichkeit von Halbleiterphotodioden im Spektralbereich von 0,7 eV bis 10 keV einheitlich auf Kryoradiometer rückgeführt (Bild 6, umseitig). Im Bereich von 10 keV bis 60 keV gelang es, die spektrale Empfindlichkeit von Halbleiterdioden auf die Freiluftionisationskammer der Abteilung 6 als Primärnormal rückzuführen, die bei BESSY II mit monochromatisierter Strahlung eines 6-Tesla-Wellenlängenschiebers betrieben wurde. Somit umfasst die Skala der spektralen Empfindlichkeit der Abteilung nunmehr fünf Dekaden der Photonenergie. Im Bereich der Photonenergien zwischen 10 keV und 60 keV wird jetzt an dem parallelen Einsatz eines Kryoradiometers und einer Freiluftionisationskammer gearbeitet, um mögliche bisher nicht erkannte Unsicherheiten der Primärnormale aufzudecken.

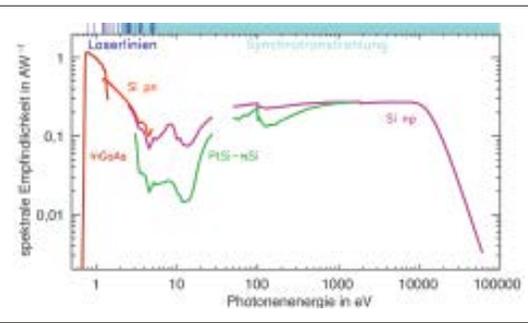


Bild 6: Spektrale Empfindlichkeit von Halbleiter-Photodioden vom nahen IR bis in den Bereich harter Röntgenstrahlung (0,7 eV bis 60 keV). Die Halbleiter-Photodioden dienen als Transfernormale für die empfangergestützte Radiometrie. Die Kalibrierung der Dioden wird im Spektralgebiet von 0,7 eV bis 10 keV einheitlich mit elektrisch kalibrierten Tieftemperatur-Hohlraumempfängern (Kryoradiometern) als Primärnormalen vorgenommen, die mit Laserstrahlung oder monochromatisierter Synchrotronstrahlung aus Bahn-Dipolmagneten betrieben werden. Für Photonenergien zwischen 10 keV und 60 keV wird die spektrale Empfindlichkeit von Halbleiterdioden derzeit auf die Freiluftionisationskammer der Abteilung 6 als Primärnormal rückgeführt, die dazu bei BESSY II mit monochromatisierter Strahlung eines 6-Tesla-Wellenlängenschiebers betrieben wurde.

Auch auf dem Gebiet der strahlergestützten Radiometrie gelang mit der Entwicklung und Charakterisierung einer Elektron-Zyklotron-Resonanz(EZR)-Strahlungsquelle der Einsatz von Transferstrahlernormalen im Spektralbereich des Vakuum-UV bei deutlich höheren Photonenergien. In der Strahlungsquelle wird durch resonante Einstrahlung einer Mikrowelle (typisch 10 W, 10 GHz) ein magnetisch eingeschlossenes, optisch dünnes,

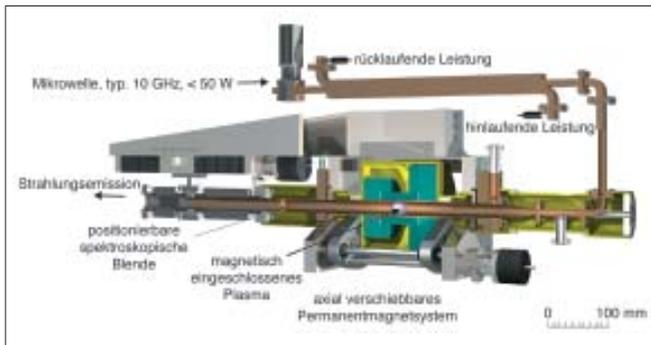


Bild 7: Schnitt durch die Elektron-Zyklotron-Resonanz(EZR)-Strahlungsquelle. In der Strahlungsquelle wird durch resonante Einstrahlung einer Mikrowelle ein magnetisch eingeschlossenes, optisch dünnes, hochionisiertes Plasma erzeugt, das Strahlung vom UV bis in den Bereich von Röntgenstrahlung emittiert.

hochionisiertes Plasma erzeugt. Die EZR-Quelle emittiert Strahlung vom UV bis in den Bereich von Röntgenstrahlung. Als erster Schritt wurde die Quelle für Photonenergien zwischen 10 eV und 100 eV kalibriert.

Die vom EZR-Plasma emittierte Vakuum-UV-Strahlung simuliert gut die von heißen astrophysikalischen Plasmen ausgesandte Strahlung. In Zusammenarbeit mit dem Max-Planck-Institut für Aeronomie wird die Strahlungsquelle daher jetzt für die radiometrische Charakterisierung von Vakuum-UV-Teleskopen der nächsten großen Sonnenmission der ESA, des Solar-Orbiter, optimiert (Bild 7).

### Temperaturmetrologie – internationale Konferenz in Berlin

Vom 19. bis 21. Juni fand in Berlin das „8<sup>th</sup> International Symposium on Temperature and Thermal Measurements in Industry and Science“ (TEMPMEKO) mit 325 Teilnehmern aus 44 Ländern statt, das die Abteilung zusammen mit dem VDI/VDE organisierte (Bilder 8 und 9). Die im Turnus von drei Jahren stattfindende Veranstaltung entwickelt sich mehr und mehr zur führenden internationalen Konferenz auf dem Gebiet der Temperaturmetrologie und ihrer Anwendungen. In über 230 Beiträgen wurden nicht nur neue Entwicklungen zur Temperaturmessung, sondern auch solche zur Feuchtemessung und zur Messung thermophysikalischer Eigenschaften behandelt. Parallel zur Konferenz fanden im Institut Berlin die Sitzungen von 18 internationalen Arbeitsgruppen statt, darunter die sieben Arbeitsgruppen des *Comité Consultatif de Thermométrie* (CCT). Auch dies unterstreicht die Bedeutung und Anziehung, die die TEMPMEKO gewonnen hat.



Bild 8: 8. TEMPMEKO-Symposium vom 19. bis 21. Juni 2001 in Berlin, Geräteausstellung

Nach der Einführung der „Provisional Low Temperature Scale“ im Jahre 2000 konzentrierten sich die Konferenzbeiträge zur Verbesserung der Temperaturskalen auf den Bereich hoher Temperaturen. Einen Schwerpunkt bildeten hier die Untersuchungen von eutektischen Fixpunkten, mit denen im Bereich bis etwa 3000 K eine verbesserte Darstellung der Temperaturskala möglich wird. Eine enge Verzahnung von Berührungs- und Strahlungsthermometrie ist bei diesen Arbeiten geboten. An diesen Entwicklungen beteiligte sich die Abteilung mit einem fachbereichsübergreifenden, von der EU geförderten Vorhaben zur „Untersuchung eutektischer Fixpunkte für die Strahlungsthermometrie, Radiometrie und für die Entwicklung von Hochtemperatur-Thermoelementen“.

Einen breiten Raum nahm auf der Konferenz auch die Behandlung der Strahlungsthermometrie ein. Neben der Verbesserung der Genauigkeit unter Laborbedingungen wurde die Bestimmung des Emissionsgrades von realen Oberflächen in zahlreichen Beiträgen erörtert. Allerdings wurden hier die noch nicht gelösten Probleme besonders deutlich. Generell dringen optische Methoden, insbesondere faseroptische Verfahren, in Bereiche vor, die bisher die Domäne der Berührungsthermometer waren. Ein bisher nicht zufriedenstellend gelöstes Problem stellen hier die Validierung der Verfahren und die Rückführung auf die Temperaturskala dar. Die Behandlung dieser Fragestellungen ist daher zügig von den metrologischen Staatsinstituten aufzugreifen.



Bild 9: 8. TEMPMEKO-Symposium vom 19. bis 21. Juni 2001 in Berlin, Conference Tour auf der Spree am Reichstag

Ein vorrangiges Thema der TEMPMEKO war auch die Behandlung der internationalen Vergleichbarkeit der Temperaturskalen. Der erreichte Stand bei den durch das „Mutual Recognition Arrangement“ (MRA) ausgelösten Vergleichsmessungen wurde breit diskutiert. Insbesondere wurden zum wiederholten Mal vereinheitlichte Verfahren zur Bewertung von Unsicherheiten erörtert. Dieses Themenfeld war bereits ausführlich in einem gemeinsam von CCT und Euromet organisierten zweitägigen „Workshop on uncertainties and CMCs in the field of thermometry“ vorbereitend im Februar 2001 bearbeitet worden. An diesem Workshop im Institut Berlin beteiligten sich die Experten der regionalen metrologischen Organisationen EUROMET, AMP, COOMET, SADC MET und SIM aus insgesamt 29 Ländern.

### Schlussbemerkung

Im Berichtsjahr standen die Vorbereitungen zum Ausbau des Standorts Adlershof im Vordergrund, so dass sich der voranstehende Bericht mit stärkerem Gewicht der Photonometrie widmet. Zu den Fortschritten und Ergebnissen im Bereich der Thermodynamik, dem zweiten Hauptarbeitsgebiet der Abteilung, wird auf die nachfolgenden Kurznachrichten verwiesen. Details zu beiden Hauptarbeitsgebieten sind aus den Publikationen der Abteilung zu entnehmen, die im Internet ([www.ptb.de](http://www.ptb.de)) unter „Publikationen/Jahresbericht“ zu finden sind.

## In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

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

### Grundlagen der Metrologie

#### Radiometrische Kalibrierungen für die ESA-Missionen ROSETTA und Mars Express

Die langjährige Zusammenarbeit mit dem Max-Planck-Institut für Aeronomie (MPAE) zur Kalibrierung von Vakuum-UV-Sonnenteleskopen wurde im vergangenen Jahr in den sichtbaren Spektralbereich und das nahe Infrarot ausgedehnt. Im Bereich von 220 nm bis 1,1  $\mu\text{m}$  erfolgte die radiometrische Charakterisierung eines 1,25-m-Ulbrichtkugelstrahlers gegen den Hochtemperatur-Hohlraumstrahler der PTB als primäres Strahllichtnormal. Die Ulbrichtkugel dient am MPAE zur Kalibrierung der OSIRIS-Kamera für die Kometenmission ROSETTA, deren Start 2003 erfolgt. Auf dem langen Weg zum Kometen Wirtanen (Rendezvous im Jahre 2011) wird OSIRIS als wichtigste Kamera an Bord zunächst im Vorbeiflug Bilder vom Mars und von zwei Asteroiden liefern.

Ebenfalls 2003 erfolgt der Start der ESA-Mission „Mars Express“. Im Auftrag der DLR wurden für die Kalibrierung des Planeten-Fourier-Spektrometers (PFS) auf „Mars Express“ Infrarot-Miniaturstrahler bis zu Wellenlängen von 5  $\mu\text{m}$  radiometrisch charakterisiert. Mit PFS sollen komplexe Moleküle in der Marsatmosphäre nachgewiesen werden.

#### Radiometrische Bestimmung immer niedrigerer Temperaturen

Absolut kalibrierte Filterradiometer erlauben die radiometrische Bestimmung thermodynamischer Temperaturen zur Verbesserung der „Internationalen Temperaturskala“ (ITS-90). Eine hochgenaue zukünftige Temperaturskala erfordert solche Messungen bis hinab zum Wassertripelpunkt, wenn die Temperatureinheit Kelvin auf einen festgelegten Wert der Boltzmann-Konstante zurückgeführt werden soll. Mit Siliziumdioden und Interferenzfiltern bei 800 nm, 900 nm und 1000 nm konnte der Messbereich zunächst bis hinab zur Temperatur des Zink-Fixpunktes (420 °C) erweitert werden. Dabei wurde mit 20 mK eine sehr geringe Standardunsicherheit für die thermodynamische Temperatur erreicht. Um künftig noch tiefere Temperaturen zu bestimmen, wurde erstmals ein Filterradiometer auf der Basis von InGaAs-Dioden mit einer Zentralwellenlänge von 1,6  $\mu\text{m}$  verwendet. Damit er-

zielte Ergebnisse stimmen im Rahmen der Messunsicherheit mit den Resultaten der auf Silizium basierenden Filterradiometer überein.

#### Robuste Fixpunktzellen für tiefe Temperaturen

Unterhalb der Temperatur des Wasserstoff-Tripelpunktes (13,803 3 K) enthält die Internationale Temperaturskala ITS-90 nur die Dampfdruck-Skalen von Helium als quasi-kontinuierliche Fixpunkte. Die Darstellung von Temperaturen erfordert hier eine aufwändige Druckmessung. Alternativ dazu wurde der Übergang des Helium-Isotops  $^4\text{He}$  in den superfluiden Zustand bei 2,176 8 K ( $\lambda$ -Punkt) zur einfachen Realisierung eines Fixpunktes vorgeschlagen, z. B. für preisgünstige und besonders genaue Kalibrierungen in Forschungseinrichtungen. Im Fachlabor *Tief-temperaturmetrologie* sind im Rahmen eines von der EU geförderten Projekts in Zusammenarbeit mit dem *B. Verkin Institute for Low-Temperature Physics and Engineering* in Khar'kov (Ukraine) kompakte und robuste  $\lambda$ -Punkt-Zellen entwickelt worden. Sie können in jeden „Dipstick“-Kryostaten eingesetzt werden und gewährleisten eine Reproduzierbarkeit des  $\lambda$ -Übergangs von rund 10  $\mu\text{K}$ .

#### Einfluss der Isotopenzusammensetzung auf die Temperatur des Wasserstoff-Tripelpunktes

Für den Wasserstoff-Tripelpunkt bei 13,803 3 K ist bisher in der Internationalen Temperaturskala ITS-90 die Deuterium-Konzentration nicht festgelegt, so dass sich bei der Benutzung unterschiedlicher Zellen unerwartet hohe Temperaturabweichungen von nahezu 1 mK ergaben. In einem von der EU geförderten Projekt wurde die Abhängigkeit der Tripelpunkttemperatur von der Isotopenzusammensetzung durch Untersuchung einer großen Anzahl unterschiedlicher Zellen von NIST, IMGC, NPL, INTiBS und PTB geklärt. Die Messungen, die als Sternvergleich unter Federführung der PTB ausgeführt wurden, ergaben eine lineare Abhängigkeit der Tripelpunkttemperatur von der Deuterium-Konzentration. Mithilfe dieses Ergebnisses lassen sich die Temperaturabweichungen jetzt um eine Größenordnung reduzieren.

#### Polarisationsechos in kalten Gläsern

Ein besonders interessanter Aspekt ungeordneter Festkörper und Gläser besteht in der Existenz atomarer Tunnelsysteme, deren dynamisches Verhalten im Magnetfeld gegenwärtig im Rahmen eines DFG-Projektes in Zusammenarbeit mit der Universität Heidelberg untersucht wird.

Bei hinreichend tiefen Temperaturen ( $T \approx 10$  mK) ist die Relaxationszeit der Tunnelsysteme in Gläsern so groß, dass die kohärente Bewegung einer Gesamtheit von Tunnelsystemen mit elektrischem Dipolmoment als makroskopische Polarisation messbar wird. Unter diesen Bedingungen lassen sich in Analogie zur magnetischen Resonanz (NMR, EPR) spontane Echos beobachten. In dielektrischen Zweipuls-Echos in einem Bariumalumosilicatglas konnte erstmals eine unerwartet starke Abhängigkeit der Echoamplitude von statischen Magnetfeldern nachgewiesen werden. Aus dem beobachteten Verlust der Phasenkohärenz können wesentliche Aussagen über die Wechselwirkung der Tunnelsysteme gewonnen werden.

#### Metrologie für die Wirtschaft

##### Weiterer Ausbau der Metrologie für die EUV-Lithographie

Die Extrem-UV-Lithographie (EUVL) gilt inzwischen als aussichtsreichstes zukünftiges Verfahren zur Erzeugung von Halbleiter-Strukturbreiten von 50 nm und darunter. Die PTB hat sich frühzeitig auf die dafür erforderlichen At-Wavelength-Messungen bei Wellenlängen um 13 nm vorbereitet, so dass das Synchrotronstrahlungslabor der PTB bei BESSY II heute ein europäisches Zentrum der EUVL-Metrologie ist, in dem für Industriepartner und Forschungseinrichtungen zahlreiche Fragestellungen bearbeitet werden. Parallel zu Messungen des Reflexionsgrades von mehr als 700 Mo/Si-Multilayerspiegeln wurde im Berichtsjahr im Rahmen des BMWi-Programms „Leistungssteigerung Infrastruktur“ der Aufbau eines neuen Reflektometers für die Charakterisierung von Spiegeln mit bis zu 0,55 m Durchmesser begonnen, das ab 2002 weltweit einmalige Messmöglichkeiten bietet. Umfangreiche Untersuchungen unter verschiedenen Vakuumbedingungen an einem neu aufgebauten Messplatz mit fokussierter Synchrotronstrahlung eines BESSY-II-Ablenkmagneten dienen dem Verständnis der

Alterung von EUVL-Optiken unter intensiver EUV-Bestrahlung. Zur weiteren Entwicklung der Systemmesstechnik für EUVL-Projektionsoptiken wurde im Juli 2001 ein Optiksystem für Waferstrukturierung des Industriepartners Carl Zeiss aufgebaut. Dieses so genannte Micro Exposure Tool mit zwei hochpräzisen asphärischen Spiegeln soll Strukturbreiten von 30 nm erzeugen können. Erste Messungen mit 13-nm-Strahlung zur Bestimmung der optischen Eigenschaften des Systems konnten bereits durchgeführt werden.

##### Quantitative Röntgenfluoreszenzanalyse für die Qualitätskontrolle von Wafern

Die Entwicklung größerer Siliziumwafer, auf die immer kleinere Strukturen fehlerfrei aufgebracht werden sollen, erfordert eine Weiterentwicklung der Qualitätskontrolle von Halbleitermaterialien. Diesem Ziel dient ein neuer Messplatz zur quantitativen Röntgenfluoreszenzanalyse im Synchrotronstrahlungslabor der PTB bei BESSY II, der die intensive, im Bereich weicher Röntgenstrahlung kontinuierlich durchstimmbare Undulatorstrahlung nutzt. Dort wurden in Zusammenarbeit mit der japanischen Firma Rigaku und der TU Wien bisher nicht berücksichtigte Sekundäreffekte wie Photoelektronen- und Kaskadenanregungen quantitativ untersucht, die berücksichtigt werden müssen, um künftige Anforderungen an die Röntgenfluoreszenzanalyse zu erfüllen.

##### Entwicklung neuer Hochtemperatur-Fixpunkte

Für die zuverlässige, rückführbare industrielle Temperaturmessung oberhalb 1100 °C fehlen langzeitstabile Hochtemperatur-Fixpunkte jenseits des Kupfererstarungspunktes (1085 °C). Einen vielversprechenden Lösungsansatz bis zu Temperaturen von 2500 °C bieten die Schmelz- und Erstarrungspunkte von Metall-Kohlenstoff-Eutektika. Erste Vergleichsmessungen von VNIIOFI, NPL und PTB ergaben Ende 2000 ausgezeichnete Übereinstimmung der gemessenen Schmelz- und Erstarrungstemperaturen. Die eingehende Untersuchung und Einführung der neuartigen Fixpunkte erfolgt jetzt in einem EU-Projekt, an dem sich NPL (Koordinator), BNM-LNE, BNM-INM, *Universität Valladolid*, Land IR und Thermocoax zusammen mit der PTB beteiligen.

### Spektroskopische Bestimmung elektrischer Feldstärken in Plasmen

Die in den letzten Jahren von der PTB für die Zwei-Photonenspektroskopie zur Flammen- und Plasmadiagnostik entwickelten Einmoden-UV-Laserspektrometer wurden bisher u. a. zur Bestimmung der Anzahldichte und kinetischen Temperatur atomaren Wasserstoffs eingesetzt. Wegen ihrer sehr geringen Bandbreite von 300 MHz ermöglicht die erzeugte Strahlung auch die Messung lokaler elektrischer Feldstärken mithilfe der Starkeffektaufspaltung von Spektrallinien. Demonstriert wurden Nachweisempfindlichkeiten von 200 V/cm bzw. 30 V/cm bei Verwendung des 1S-2S- bzw. 1S-3S/D-Übergangs des atomaren Wasserstoffs. Im nächsten Schritt soll die Methode zu einem flächenhaften Messverfahren weiterentwickelt werden, das es erlaubt, mit dopplerfreier zweiphotonen-induzierter Balmer- $\alpha$ -Fluoreszenz in kurzer Zeit die elektrische Feldstärkeverteilung in einer ganzen Querschnittsebene vor planaren Elektroden von Niederdruckentladungen zu vermessen (single-shot sheet diagnostic).

### Computergesteuerte Hochleistungs-SQUID-Elektronik

Die Leistungsfähigkeit von Sensorsystemen auf der Basis supraleitender Quanteninterferenz-Detektoren (sog. SQUIDs) wird entscheidend von der SQUID-Elektronik mitbestimmt. Eine neu entwickelte, vollständig computergesteuerte SQUID-Elektronik vereint jetzt die Funktionen aller früheren Versionen mit rein analoger Ansteuerung ohne Qualitätseinbuße und erlaubt die flexible Anpassung der Elektronik an die jeweilige Messaufgabe. Herzstück der neuen Elektronik ist die sog. FLL-Einheit, eine Kombination aus extrem rauscharmen Analogschaltungen und digitalen Komponenten wie z. B. leistungsfähigen Mikro-Controllern.

### Metrologie für die Gesellschaft

#### Monochromatische Röntgenstrahlung für die Mammographie

Für die Mammographie wird die Röntgenstrahlung von Molybdän- oder Rhodium-Röhren genutzt. Obwohl dabei das emittierte Spektrum durch Filter eingeschränkt wird, treffen immer noch viele niederenergetische Photonen auf das Gewebe, die dort vollständig absorbiert werden und nur zur Strahlenbelastung, nicht aber zur Bildgebung beitra-

gen. Andererseits erreichen hochenergetische Photonen den Detektor, die durch Streuung die Bildqualität verschlechtern. In einem gemeinsamen Projekt mit zwei Industriepartnern (Schering AG und Institut für Gerätebau) und der radiologischen Abteilung der Berliner Charité konnte gezeigt werden, dass durch die Verwendung monochromatischer Röntgenstrahlung die Strahlenbelastung ohne Verlust an Bildkontrast deutlich reduziert werden kann.

### Überarbeitung der OIML-Empfehlung R75 für Wärmehäher

Nach der Verabschiedung der Measuring Instruments Directive (MID) im europäischen Rat und Parlament ist ab 2002 mit deren schrittweiser Einführung zu rechnen. Das Fachlabor *Messung thermischer Energie* hat sich umfassend darauf vorbereitet und die Voraussetzungen dafür geschaffen, dass die PTB als Benannte Stelle Konformitätsuntersuchungen von Wärmehählern anbieten kann, die alle Prüfarten umfassen („one-stop testing“). Künftig werden Konformitätsbewertungen die bisherigen Ersteichungen von Wärmehählern ersetzen. Die Projektgruppe 1 des technischen OIML-Komitees 11 (Instruments for measuring temperature and associated quantities) überarbeitete deshalb unter Leitung des Fachlabors *Messung thermischer Energie* die OIML-Empfehlung R75, um sie an die neuen Anforderungen anzupassen.

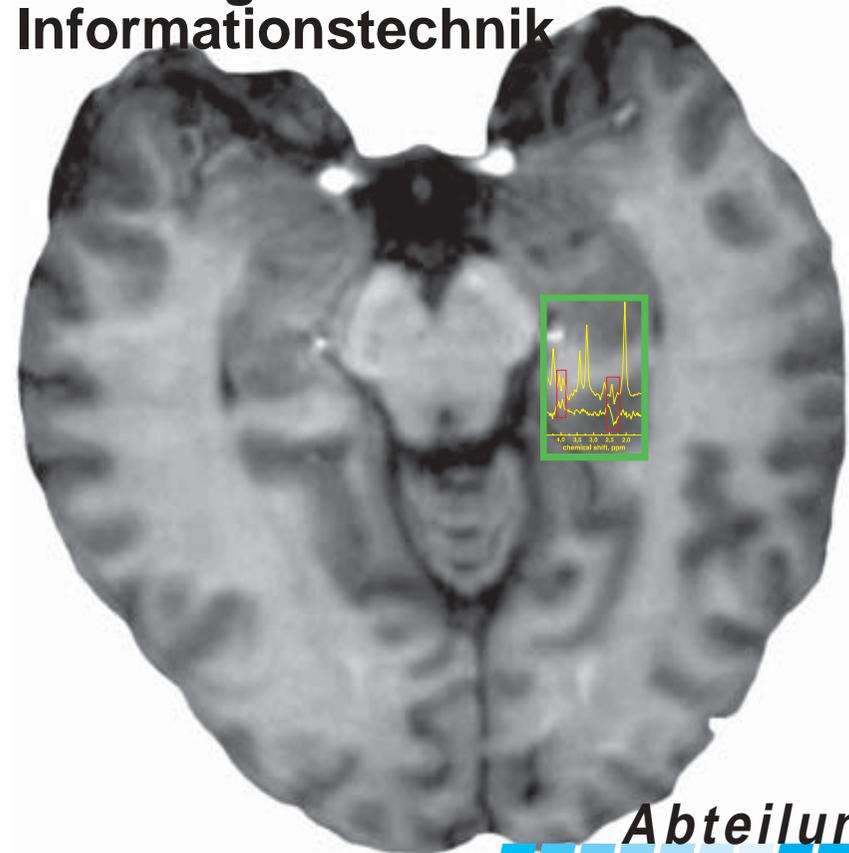
### Internationale Angelegenheiten

#### Rückführung der Temperaturskalen anderer Staatsinstitute auf PTB-Normale

Die DKD-Akkreditierung wird auch für ausländische Staatsinstitute als überzeugendes Qualitätskriterium angesehen. Derzeit sind die Staatsinstitute von Argentinien, Chile und Uruguay akkreditierte DKD-Laboratorien für das Fachgebiet Temperatur. Die Akkreditierung eines weiteren Staatsinstituts steht bevor.

Das Fachlabor *Thermometrie* hat mit zahlreichen anderen Staatsinstituten bilaterale Vergleiche durchgeführt. In den letzten Jahren waren dies neben den Staatinstituten von Argentinien, Chile und Uruguay auch die von Irland, Österreich, Slowenien, Estland, Türkei, Thailand, Indonesien, Mexiko, Costa Rica und Brasilien. In fast allen Fällen war mit den Vergleichsmessungen auch ein Training von Mitarbeitern der jeweiligen Institute verbunden.

## Medizinphysik und metrologische Informationstechnik



# Medizinphysik und metrologische Konstruktivtechnik

## Gesetzliche Regelungen auf dem Gebiet der medizinischen Messtechnik

Im 2. Änderungsgesetz des Medizinproduktegesetzes (2. MPG-ÄndG), welches voraussichtlich im Jahre 2002 in Kraft tritt, wird der § 33 des Medizinproduktegesetzes (MPG) neu gefasst, der bisher die gesetzliche Grundlage für die Aktivitäten der Abteilung auf dem Gebiet der Medizinphysik bildete. In § 32 (3) des Entwurfs des 2. MPG-ÄndG heißt es: „Die Physikalisch-Technische Bundesanstalt ist zuständig für die Sicherung der Einheitlichkeit des Messwesens in der Heilkunde und hat 1. Medizinprodukte mit Messfunktion gutachterlich zu bewerten. ..., 2. Referenzmessverfahren, Normalmessgeräte und Prüfmittel zu entwickeln und auf Antrag zu prüfen und 3. die zuständigen Behörden und Benannten Stellen wissenschaftlich zu beraten.“ Damit werden die im 2. MPG-ÄndG genannten Aufgaben der PTB auf dem Gebiet der medizinischen Messtechnik der bereits geübten Praxis angepasst und die Zuständigkeit der PTB, die Voraussetzungen für einheitliches Messen in der Medizin zu schaffen, klar definiert.

Artikel 11 des 2. MPG-ÄndG fasst Änderungen der Medizinprodukte-Betreiberverordnung (MP-BetreibV) zusammen. In § 4a der Neufassung der MP-BetreibV, der Kontrolluntersuchungen und Vergleichsmessungen in medizinischen Laboratorien regelt, wird auf die Neufassung der „Richtlinie der Bundesärztekammer zur Qualitätssicherung quantitativer laboratoriumsmedizinischer Untersuchungen“ (RiliBÄK) verwiesen, die im Oktober 2001 im Deutschen Ärzteblatt veröffentlicht wurde. Nach mehrjährigen Beratungen, an denen sich die *Abteilung 8* intensiv beteiligt hat, wurde die Überarbeitung der RiliBÄK im

Sommer 2001 abgeschlossen und die im Einvernehmen mit der PTB erstellte Neufassung vom Vorstand der Bundesärztekammer genehmigt. Die Überarbeitung der alten, aus dem Jahre 1987 stammenden RiliBÄK war notwendig geworden, um der europäischen Gesetzgebung, insbesondere der Richtlinie 98/79/EG über In-vitro-Diagnostika aus dem Jahre 1998 Rechnung zu tragen. Die Anlage 1 der RiliBÄK, welche die Analyte, die der internen und externen Qualitätssicherung unterworfen sind, und die maximal zulässigen Fehlergrenzen enthält, wird in der Neufassung der Richtlinie dynamisiert, d. h. die Anlage 1 kann in Zukunft dem Stand der medizinischen Wissenschaft und der Analysetechnik angepasst werden. Die neue Richtlinie schreibt die Teilnahme von einem Ringversuch pro Quartal im Rahmen der externen Qualitätssicherung vor, während bisher die Teilnahme an nur zwei Ringversuchen pro Jahr gefordert war. In die Anlage 1 der RiliBÄK wurden erstmals die Messgrößen des kleinen Blutbildes aufgenommen, so dass die Teilnahme an entsprechenden Ringversuchen künftig zur Pflicht wird, während bisher die Teilnahme an Ringversuchen zum kleinen Blutbild auf freiwilliger Basis erfolgte. Durch die Aufnahme der Messgrößen des kleinen Blutbildes in die Anlage 1 werden die langjährigen erfolgreichen Bemühungen des Fachlaboratoriums 8.11 *Messtechnik in der Laboratoriumsmedizin* bei der Entwicklung von Normalmesseinrichtungen für Blutzellzählung sowie die Mitarbeit der PTB in entsprechenden Normungsgremien gewürdigt. Das Fachlaboratorium 8.11 ist Referenzlaboratorium für die Messgrößen des kleinen Blutbildes und nimmt seit vielen Jahren regelmäßig an den entsprechenden Ringversuchen teil.

## Quantitative Bildgebung für die medizinische Diagnostik

Die *Abteilung 8* führt in erheblichem Maße Forschungs- und Entwicklungsarbeiten für eine quantitative Bildgebung in der medizinischen Diagnostik durch. Neben der bildgebenden Darstellung der Anatomie und Morphologie des Körpers findet die so genannte funktionelle Bildgebung eine breite Anwendung in der Medizin. Zunehmend werden multimodale Techniken, also die Kombination verschiedener bildgebender und funktioneller Verfahren, eingesetzt. Akustische Reize rufen im Kortex als Reizantwort biomagnetische Felder hervor, die mit dem 80-kanaligen MEG-System der PTB aufgenommen werden können. Im Bild 1 sind die Zeitsignale aller Kanäle überlagert dargestellt, die Reizantwort, 80 ms bis 200 ms nach dem Reiz, ist deutlich zu erkennen.

Mit dem 3-Tesla-Ganzkörpermagnetographen der PTB wurden die MRI-Aufnahmen der morphologischen Hirnstruktur für ausgewählte Querschnitte gewonnen (Bild 2, umseitig). Aus den MEG-Signalamplituden konnten unter der Nutzung bestimmter Modellvorstellungen die Orte der Aktivierung im Gehirn berechnet und in die MRI-Schnittbilder projiziert werden (grüne Symbole). Zwei Aktivitäten sind im jeweiligen auditorischen Kortex der rechten und linken Hirnhälfte lokalisiert. Die dritte Aktivität im vorderen Hirnbereich tritt nur auf, wenn eine hohe Aufmerksamkeit des Probanden vorlag. In der neurologischen Grundlagenforschung nehmen Aufmerksamkeitsstudien der beschriebenen Art einen hohen Stellenwert ein. Aufmerksamkeitsstudien erlangen aber auch zur Diagnose und Therapieverlaufskontrolle von Alterskrankheiten zunehmende Bedeutung. Die PTB leistet hier wichtige Beiträge zu den damit zusammenhängenden messtechnischen und signalanalytischen Fragestellungen.

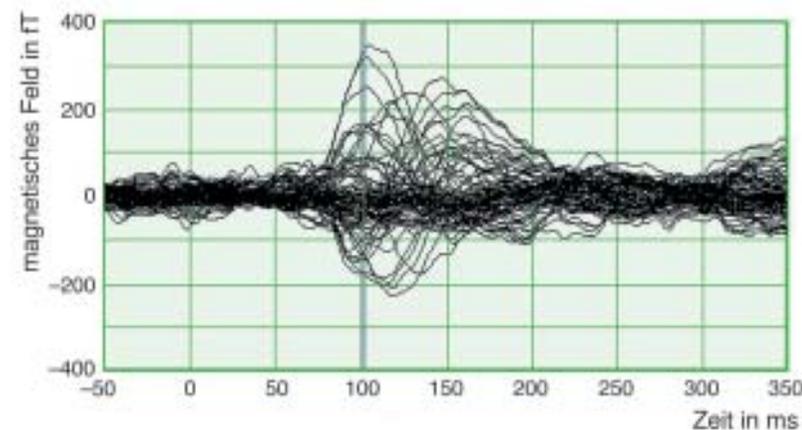


Bild 1: Gemittelte Zeitverläufe von akustisch evozierten biomagnetischen Feldern des Gehirns, gemessen mit dem 80-kanaligen SQUID-MEG-System der PTB

**Titelbild**  
NMR-Schnittbild durch das Gehirn eines Probanden mit NMR-Spektrum des Neurotransmitters Glutamat (rot markierte Bereiche)

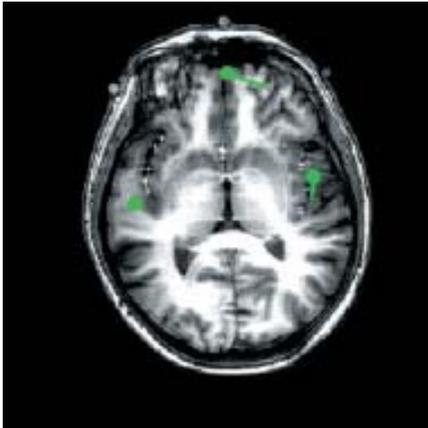
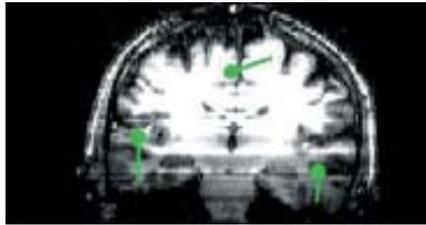
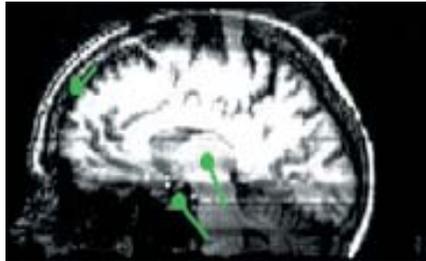


Bild 2: Aus dem MEG abgeleitete Orte der Aktivierung (grüne Dipolsymbole) in der linken und rechten Hirnhälfte 102 ms nach akustischer Stimulation

Eine andere Form der Bildgebung mit biomagnetischen Methoden ist im Fachlaboratorium 8.21 für die Magnetokardiographie entwickelt worden: Durch eine geeignete Transformation der sonst üblichen Isofeldliniendarstellung der Magnetfeldverteilung („Mapping“) kann eine – wenn auch geometrisch nicht exakt zuordbare – 2-D-Darstellung der Stromdichteverteilung gewonnen werden. Die Aneinanderreihung dieser Bilder zu einer Video-Animation zeigt sehr deutlich die dynamischen Aspekte der Erregungsausbreitung im Myokard. Diese Darstellung ermöglicht es dem Kardiologen in intuitiver Weise, sich ein Bild von der Erregungsausbreitung im Herzen und von eventuellen pathologischen Abweichungen zu machen.

Zu Beginn des Jahres 2001 hat das europäische Forschungsvorhaben „Optical Mammography: Imaging and characterisation of breast lesions by pulsed near-infrared laser light“ seine Arbeit aufgenommen, welches von der Abteilung 8 koordiniert wird und neun europäische medizin-physikalische Zentren und Kliniken umfasst. Ziel des Vorhabens ist es, das diagnostische Potential und den prognostischen Wert der zeitaufgelösten optischen Mammographie durch klinische Studien zu ermitteln, die durch die beteiligten medizin-physikalischen Zentren messtechnisch begleitet werden. Im Rahmen dieses Vorhabens sind von der Robert-Rössle-Klinik, Berlin-Buch, in Zusammenarbeit mit dem



Fachlaboratorium 8.12 inzwischen ca. 70 Patientinnen untersucht worden. Die optischen Mammogramme werden einerseits retrospektiv statistisch ausgewertet, um die Sensitivität des Verfahrens zu bestimmen, andererseits werden die Mammogramme hinsichtlich der Absorptions- und Streueigenschaften von normalem Brustgewebe und von Tumorgewebe analysiert, um die mittlere Hämoglobinkonzentration bzw. das relative Blutvolumen und die Sauerstoffsättigung des Blutes im jeweiligen Gewebe zu bestimmen. Ob diese Messgrößen geeignet sind, die Unterscheidung zwischen Tumoren und Normalgewebe entscheidend zu verbessern oder ob hierfür von außen zugeführte (exogene) Kontrastmittel benötigt werden, ist zurzeit noch unklar.

Zur Verbesserung der Genauigkeit des Messverfahrens wurden die im Jahr 2000 begonnenen Arbeiten zur Aufrüstung des Laserimpuls-Mammographen auf acht Nachweiskanäle zur simultanen Aufnahme von optischen Mammogrammen bei vier optischen Wellenlängen und unter sechs verschiedenen Projektionswinkeln weitergeführt. Weiterhin wurde ein Kooperationsvertrag mit der Berliner Firma PicoQuant GmbH über die Entwicklung eines Prototyps für einen kommerziellen Laserimpuls-Mammographen abgeschlossen. Dieser Technologietransfer im Rahmen eines F&E-Vorhabens wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) finanziell unterstützt.

Kontrastmittel spielen in der medizinischen Bildgebung eine große Rolle, um Organe oder auch Gewebeveränderungen (z. B. Tumore) darzustellen. Die Abbildung der Lunge mittels einer Protonen-Kernspintomographie ist schwierig, da das beobachtete Signal sehr schnell abfällt und zum Signal nur das Lungengewebe selbst beiträgt, nicht jedoch die in der Lunge befindliche Luft. Edelgase ( $^3\text{He}$ ,  $^{129}\text{Xe}$ ) lassen sich durch optisches Pumpen mit Laserstrahlung zu einem hohen Grade (hyper)polarisieren, d. h. ihren Kernspin ausrichten und somit als Kontrastmittel für eine NMR-Bildgebung einsetzen. Amerikanische und deutschen Forschergruppen ist es gelungen, nach Einatmen von hyperpolarisiertem  $^3\text{He}$  die Lunge mit Hilfe der Kernspintomographie abzubilden und dynamische Studien der Lungenfunktion durchzuführen. Das Isotop  $^3\text{He}$  ist jedoch nur schwer verfügbar, im Gegensatz zu  $^{129}\text{Xe}$ , welches mit einer Häufigkeit von etwa 25 % in natürlichem Xenon-Gas vorkommt. Darüber hinaus löst sich Xenon in Blut und Gewebe, z. B. Hirngewebe, und eröffnet damit andere medizinische Anwendungen. Im Fachlaboratorium 8.12 wurde im Rahmen einer Doktorarbeit eine Apparatur zur Erzeugung einer ausreichenden Menge (0,5 l/h) von hyperpolarisiertem nat. Xenon-Gas mit einem Polarisationsgrad von 20 % bezogen auf  $^{129}\text{Xe}$  aufgebaut, um eine Abbildung der Lunge (Bild 3) oder eine spektroskopische Bildgebung des

Gehirns mit Hilfe der Kernspintomographie durchzuführen. Anwendungen von hyperpolarisierten Edelgasen als Kontrastmittel für die Kernspintomographie befinden sich zurzeit noch im Forschungs- oder Erprobungsstadium, insbesondere ist für hyperpolarisiertes Xenon derzeit noch nicht abzusehen, für welche medizinischen Fragestellungen es eingesetzt werden kann. Es ist denkbar, dass hyperpolarisiertes Xenon auch als Kontrastmittel in der SQUID-Messtechnik Verwendung finden kann.

Die Motorik des Gastrointestinaltraktes und die Passage von Nahrungsbestandteilen während des Verdauungsvorgangs lässt sich mit Hilfe einer in der PTB entwickelten, biomagnetischen Messtechnik untersuchen. Hierbei wird die Passage einer gekapselten magnetischen Sonde durch den Gastrointestinaltrakt mit Hilfe der SQUID-Messtechnik verfolgt, wobei der Ort und die Ausrichtung der Sonde, d. h. ihres magnetischen Dipolmomentes, sich zu jedem Zeitpunkt bestimmen lassen (Bilder 4 und 5, umseitig). Dieses Verfahren lässt sich in modifizierter Form zur Untersuchung der Wirkstofffreisetzung von Arzneimitteln heranziehen, die sich in bestimmten Bereichen des Magen-Darm-Traktes auflösen sollen. Hierzu wird eine magnetisch markierte Sonde aus der gleichen auflösbaren Matrix eingesetzt, wie sie für Arzneimittelwirkstoffe verwendet wird. Im Rahmen einer von der

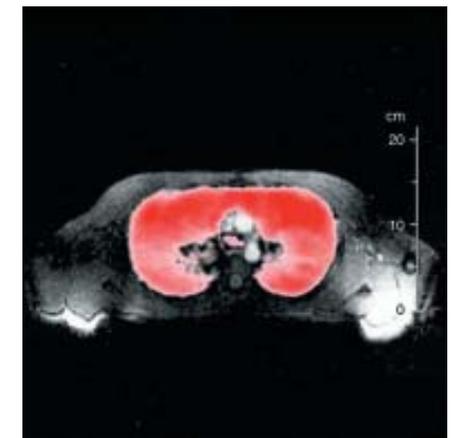
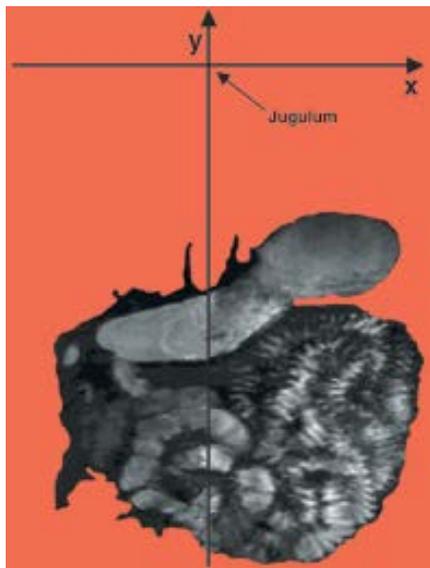


Bild 3: Lungenbildgebung (koronaler Schnitt (links), transversaler Schnitt (rechts)) mit hyperpolarisiertem Xenon (Polarisationsgrad 8 %). Die Xenon-Aufnahmen (rot) der Lunge wurden in Protonenaufnahmen integriert.

DFG seit Sommer 2001 geförderten Kooperation zwischen dem Fachlaboratorium 8.21 der PTB, der Medizinischen Klinik mit Schwerpunkt Hepatologie und Gastroenterologie der Charité (Virchow-Klinikum) und dem Institut für Pharmazie der Universität Greifswald werden die Anwendungen dieses Diagnoseverfahrens weiterentwickelt.

Von besonderem Interesse für die medizinische Diagnostik ist die Abbildung von Tumoren, insbesondere kleiner Tumoren. In einer Zusammenarbeit des Fachlaboratoriums 8.12 mit der Schering AG (Institut für Diagnostikforschung) und der Medizinischen Klinik mit Schwerpunkt Hepatologie und Gastroenterologie der Charité (Virchow-Klinikum) ist ein erster Schritt zur Fluoreszenz-Abbildung von Tumoren in vivo mittels molekularer Sonden gelungen. Hierbei wurde einem Tumormodell ein mit einem Fluoreszenzfarbstoff markiertes, an Tumorzellen spezifisch bindendes Oligopeptid injiziert und der Tumor mit gutem Kontrast/Rauschverhältnis anhand der Laser-induzierten Fluoreszenz abgebildet. Wegen der hohen Spezifität der verwendeten molekularen Sonde war die für eine Abbildung des Tumors eingesetzte Menge an Oligopeptid um einen Faktor 100 geringer als bei früheren Untersuchungen.

Bild 4: Röntgenaufnahme des Magen-Darm-Trakts

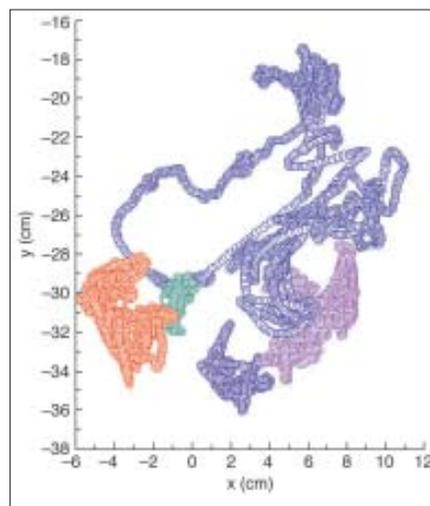


Körpereigene Substanzen können ebenfalls als optische Kontrastmittel zur Unterscheidung von Tumoren und Normalgewebe dienen. Im Rahmen einer langjährigen Kooperation zwischen der Robert-Rössle-Klinik, Berlin-Buch und dem Fachlaboratorium 8.12 wurde beobachtet, dass Darmtumoren und befallene Lymphknoten eine erhöhte Fluoreszenz zeigen, die von Protoporphyrin IX herrührt. Die Unterscheidung der Protoporphyrin-IX-Fluoreszenz gegenüber der Gewebeeigenfluoreszenz beruht wesentlich auf einem von der PTB entwickelten Messverfahren, welches die unterschiedlichen Fluoreszenz-Abklingzeiten ausnutzt. Die in Cancer Research (2001) erschienene gemeinsame Arbeit „Protoporphyrin IX Occurs Naturally in Colorectal Cancers and Their Metastases“ wurde durch die Verleihung des Georg-Heberer-Award 2001 für chirurgische Forschung der Chiles Foundation (USA) an den medizinischen Kooperationspartner, Dr. med. K. Th. Moesta (Robert-Rössle-Klinik, Berlin-Buch), ausgezeichnet.

#### Messtechnik für molekulare Medizin

Das Kuratorium der PTB hat auf seiner Sitzung im März 2001 dem BMWi und der PTB empfohlen, das Arbeitsgebiet „Messtechnik für molekulare Medizin“ durch die Abteilung 8

Bild 5: Rekonstruktion des Pfads einer magnetisch markierten Sonde durch den Magen-Darm-Trakt



aufzugreifen zu lassen und hierfür die vielfältigen Kontakte und Kooperationen der Abteilung zu Berliner Kliniken, zu Industrieunternehmen und biomedizinischen Einrichtungen zu nutzen. Inzwischen wurden erste Kontakte zum Max-Delbrück-Centrum für molekulare Medizin geknüpft und auch im Rahmen bestehender Kooperationen (Robert-Koch-Institut, Berlin; Charité, Virchow-Klinikum und Robert-Rössle-Klinik, Berlin-Buch) Möglichkeiten einer Zusammenarbeit auf diesem Gebiet ausgelotet.

#### Schutz und Sicherheit von Software und IT-Komponenten

Im Jahre 2001 gewannen Fragen des Schutzes und der Sicherheit von Software und von informationstechnischen Komponenten in Messsystemen deutlich an Bedeutung. Der Fachbereich 8.3 hat diesem Gebiet verstärkte Aufmerksamkeit geschenkt, indem er seine Beratungstätigkeit für Industrie, Behörden, Politik sowie im internationalen Rahmen verstärkt, neue Zuständigkeiten übernommen und neue Aufgabenstellungen aufgenommen bzw. Vorhaben begonnen hat.

Es wurde im Sommer 2001 ein Koordinierungsgremium in der PTB für Software und IT-Fragen im gesetzlichen Messwesen eingerichtet, das vom Fachbereichsleiter 8.3 geleitet wird. Die PTB trägt mit dieser Entscheidung organisatorisch der zunehmenden Bedeutung von Software und anderen IT-Komponenten in Messgeräten Rechnung. Darüber hinaus soll erreicht werden, dass die PTB im Dialog mit der Industrie ihre international bedeutende Rolle auf dem Gebiet der Software und anderer IT-Fragen im gesetzlichen Messwesen erhalten und möglichst ausbauen kann. Aktuelle, zu behandelnde Themen sind das Laden eichpflichtiger Software in Messgeräte oder die Nutzung offener Kommunikationsmedien wie das Internet für die Übertragung eichpflichtiger Messdaten, für die Schutzanforderungen ausgearbeitet und abgestimmt werden sollen. Neben fachlichen Aspekten erstreckt sich die Koordinierungstätigkeit insbesondere auch auf die Erarbeitung und Vertretung von abgestimmten fachlichen Positionen in nationalen und internationalen Gremien sowie auf die Mitwirkung in nationalen und europäischen Forschungs- und Entwicklungsprojekten.

Zur Förderung der Harmonisierung von Softwareanforderungen und Prüfvorgängen im Zuge der vorgesehenen Einführung einer einheitlichen europäischen Messgerätespezifikationslinie (MID) ist unter Federführung des Fachbereiches 8.3 ein europäisches Vorhaben beantragt und bestätigt worden. An diesem Vorhaben sind 16 Partner aus zwölf europäischen Ländern beteiligt. Dieses Vorhaben, das schwerpunktmäßig die Erarbeitung von Schutzanforderungen an Software in Messgeräten zum Ziel hat, wird in enger Kooperation mit den bestehenden Gremien der WELMEC durchgeführt werden.

Im nationalen Rahmen ist die PTB mit mehreren Organisationseinheiten an einem im Jahre 2001 begonnenen, von BMWi geförderten Vorhaben zur sicheren elektronischen Übertragung von Messdaten unter Federführung des Fachlaboratoriums 8.32 Messdatenübertragungstechnik beteiligt. Im Rahmen dieses Vorhabens, an dem sich Hersteller, Energieversorgungsunternehmen und Forschungseinrichtungen bzw. staatliche Stellen beteiligen, soll ein ausreichend gesichertes System zur Übertragung abrechnungsrelevanter Messdaten von Strom-, Gas- und Wasserzählern über offene Netze entwickelt werden. Fragen hinsichtlich des Schutzes der Information stellen sich auch bei der Funkübertragung von Messdaten. In Zusammenarbeit mit Partnern aus der Industrie führt das Fachlaboratorium 8.32 Untersuchungen durch, die der Ausarbeitung entsprechender Schutzanforderungen und Prüfverfahren dienen.

Fragen der Sicherheit stellen sich in ganz besonderem Maße beim Einsatz von softwaregesteuerten Wahlgeräten. Das Fachlaboratorium 8.33 Spielgeräte und das Projekt 8.302 Softwareprüfung und -qualitätssicherung haben im Jahre 2001 weitere Prüfungen von Wahlgeräten durchgeführt, darunter auch Wahlgeräte für Wahlen auf Landes- und Kommunalebene. Auf Grund des gewachsenen Vertrauens in softwaregesteuerte Wahlgeräte, das nicht zuletzt auf den gründlichen Prüfungen der PTB basiert, steigt der Einsatz solcher Geräte in der Bundesrepublik Deutschland. Darüber hinaus gibt es einen ausländischen Prüfantrag für ein softwaregesteuertes Wahlgerät und weitere Bestrebungen des Auslands, das Vertrauen in die Sicherheit softwaregesteuerter Wahlgeräte durch Prüfungen

in ihren Ländern in Anlehnung an die von der PTB entwickelten Prüfkriterien bzw. durch eine von der PTB durchgeführte Prüfung zu erhöhen.

Über den Einsatz von Wahlgeräten hinaus ist die PTB an Diskussionen zur Vorbereitung von Online-Wahlen beteiligt. Die Bundesregierung fördert die Schaffung von sicherheitstechnischen Grundlagen, um zukünftig öffentliche Wahlen durch Vernetzung von Wahllokalen zu unterstützen. In einer vom Bundesinnenministerium geführten, interministeriellen Arbeitsgruppe zu diesen Fragen ist die PTB durch den Fachbereich 8.3 vertreten.

Beratung und Unterstützung wurde im Jahre 2001 – wie auch in den Jahren zuvor – den Ländern beim Vollzug der Spielverordnung gewährt. Das betrifft sowohl bauartsspezifische Fragen als auch grundsätzliche Fragen zum Spielrecht. Die bereits im Jahre 2000 begonnenen Prüfungen von Jackpot-Systemen wurden fortgesetzt und Vollzugsbehörden in den Ländern durch entsprechende Veranstaltungen und Bereitstellung von umfangreichem Material umfassend informiert.

Für die Bauartprüfung von Geldspielgeräten ist im Fachbereich 8.3 ein neuartiges informationstechnisches Konzept zur Überwachung der gesetzlichen Vorgaben entwickelt worden. Es folgt inhaltlichen, zwischen dem BMWi, dem Verband der Deutschen Automatenindustrie und der PTB abgestimmten Eckpunkten, die den Kern einer künftigen Verordnung bilden sollen und als Grundlage der inzwischen hierüber begonnenen politischen Gespräche dienen. Mit der Anwendung dieses Konzeptes würde erstmals die Einhaltung der wichtigsten Anforderungen zum Schutz des Spielers automatisch mit informationstechnischen Mitteln überprüft werden können.

### Datenanalyseverfahren für Ringvergleiche

Die Qualitätssicherung von in der Messtechnik eingesetzten Auswerteverfahren wird durch die Entwicklung neuer Verfahren zur Datenanalyse und zur Messunsicherheitsbestimmung sowie durch vergleichende Bewertungen von Methoden unterstützt. Für die Datenanalyse von Ringvergleichen (key comparisons) wurden im Fachlaboratori-

um 8.31 auf der Basis realistischer Simulationen verschiedene Verfahren zur Bestimmung von Referenzwerten verglichen. Als Ergebnis lassen sich die unterschiedlichen Methoden zur Ermittlung von Referenzwerten hinsichtlich ihrer Zuverlässigkeit und ihrer Robustheit z. B. gegenüber unterschätzten Unsicherheiten oder Ausreißern von Messwerten charakterisieren. Die verschiedenen Methoden zur Bestimmung von Referenzwerten wurden weiterhin bei einer vorläufigen Analyse eines Ringvergleichs für Beschleunigungsaufnehmer angewendet. Die dabei erhaltenen Ergebnisse weisen in Übereinstimmung mit den Simulationsstudien darauf hin, dass z. B. das einfache gewichtete Mittel für die Bestimmung der Referenzwerte empfohlen werden kann.

Werden derartige Ringvergleiche in Abhängigkeit von einem äußeren Parameter (z. B. Frequenz, Temperatur) durchgeführt, so lassen sich die Messdaten mit einem neuartigen, modellgestützten Auswerteverfahren analysieren, welches im Fachlaboratorium 8.31 entwickelt und erfolgreich angewendet wurde. Das Verfahren erfordert ein physikalisches Modell für die Beschreibung der Abhängigkeit der Messwerte von dem äußeren Parameter. Durch die Verwendung des physikalischen Modells lassen sich genauere, mit kleineren Unsicherheiten behaftete Referenzwerte bestimmen, als dies mit Standardverfahren möglich ist. Darüber hinaus können die Referenzwerte für jeden Wert des äußeren Parameters berechnet werden. Zur Bestimmung der Referenzwerte als Funktion des äußeren Parameters wird ein gewichtetes Ausgleichsverfahren verwendet. Explizite Ausdrücke für die resultierenden Unsicherheiten der Referenzwertkurve sowie für die Korrelationen zwischen den erhaltenen Referenzwerten und den einzelnen Eingangsgrößen wurden abgeleitet. Damit lassen sich selbst für diese aufwändigere Analyse in einfacher Weise die Unsicherheiten für die Abweichungen der einzelnen Eingangsgrößen von den erhaltenen Referenzwerten berechnen, so dass der so genannte „degree of equivalence“ bestimmt werden kann.

## In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

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

### Grundlagen der Metrologie

#### SQUID-Nachweis der freien Spinpräzession von hyperpolarisiertem $^3\text{He}$

In Zusammenarbeit mit dem *Institut für Physik der Universität Mainz* wurde die freie Spinpräzession von durch spezielle Pumpen hyperpolarisiertem  $^3\text{He}$  bei niedrigen Magnetfeldstärken ( $B_0 = 400 \text{ nT}$ ) mittels SQUID beobachtet.

#### Konfokales Laser-Scanning-Fluoreszenz-Mikroskop zur Detektion einzelner Moleküle

Für die Entwicklung hochempfindlicher Analyse- und Messverfahren für die molekulare Medizin und Gentechnik wurde im Fachlaboratorium 8.11 ein konfokales Fluoreszenzmikroskop für den Einzelmolekülnachweis aufgebaut und erfolgreich getestet.

#### Messungen des statischen Magnetfeldes mit SQUIDS

Zur Vermessung des (absoluten) statischen Magnetfeldes im Inneren des neuen, magnetisch superschirmenden Raumes im Hermann-von-Helmholtz-Bau wurde ein SQUID-Messsystem aufgebaut, mit dem sich an jedem Punkt die drei (orthogonalen) Komponenten des Magnetfeldes bestimmen lassen. Die Messgrenze für den Betrag des Magnetfeldvektors liegt bei  $20 \text{ pT}$ .

#### Multikanal SQUID-Elektronik mit digitaler Ansteuerung in SMD-Technik

Das in der PTB entwickelte SQUID-Vektor-Magnetometer-Messsystem für den magnetisch superschirmenden Raum im Hermann-von-Helmholtz-Bau wird 304-SQUID-Chips enthalten. Hierfür war nur eine komplette Neuentwicklung der SQUID-Elektronik in vollständiger SMD-Bauweise notwendig.

#### Ausbau des MEG-Ganzkopfsystems

Das im Sommer 2000 in Betrieb genommene 80-kanalige MEG-System der japanischen Firma Eagle Technology Inc. wurde mit weiteren 15 Referenz-SQUID zur Störsignalunterdrückung versehen sowie für den weiteren Ausbau mit SQUID-Chips der PTB vorbereitet. Der Aufbau wurde weiterhin mit einem eigenentwickelten, hochauflösenden 32-kanaligen EEG-System ergänzt.

### Aufbau und Test eines 10-kHz-Kryofilters

Um die spektrale Reinheit käuflicher Sinusgeneratoren zu verbessern, wurde ein mit flüssigem Helium gekühlter Kryofilter als Parallelschwingkreis mit kapazitiver Transformation aufgebaut. Spektral extrem reine Sinussignale werden u. a. für den Test von hochauflösenden Analog-Digital-Umsetzern (ADU) eingesetzt.

### Harmonisierung von Suszeptibilitätsmessungen

Im Rahmen des DFG-Schwerpunktprogramms „Kolloidale magnetische Flüssigkeiten“ wurde von der PTB im Teilprojekt „Charakterisierung der magnetischen und hydrodynamischen Eigenschaften von Ferrofluiden, Harmonisierung der Messverfahren“ ein Messunsicherheitsbudget für die Messung der DC-Anfangssuszeptibilität aufgestellt, das als Grundlage für die Harmonisierung der magnetischen Messtechnik in den Laboratorien der Teilnehmer des Schwerpunktprogramms dienen soll.

### Rekonstruktion von Oberflächenprofilen aus Krümmungsmessungen

Im Fachlaboratorium 8.31 wurde die Rekonstruktion von Oberflächenprofilen aus Krümmungsmessungen untersucht und die Stabilität der dabei eingesetzten Verfahren theoretisch bzw. durch Simulationsrechnungen nachgewiesen.

### Messdatenbanken mit Internet-Zugriff

Im Laboratorium 8.31 wurde ein Konzept zur datenbankgestützten Bearbeitung von Kalibriervorgängen mit Zugriff und Nutzung aus dem Web entwickelt und im Laboratorium *Vakuummetrologie* exemplarisch angewendet. Das Managementsystem schließt Messdaten, Dokumente und Bearbeitungsvorgänge ein.

### SQUID-Messsystem für ungeschirmte Umgebung

Im Rahmen des im Jahre 2000 abgeschlossenen BMBF-Vorhabens „Magnetrelaxometrie“ wurde ein SQUID-Messsystem entwickelt, das in magnetisch nicht geschirmter Umgebung spezifische biochemische Bindungen mit dem Verfahren der Magnetrelaxometrie nachzuweisen gestattet.

**Validierung von Messunsicherheitssoftware**

Von der Softwareprüfstelle wurde das in der PTB eingesetzte Softwarepaket „GUM Workbench“ der Firma Metrodata validiert. Dazu ist ein umfangreicher Anforderungskatalog ausgearbeitet und als Grundlage der Prüfung verwendet worden.

**Messunsicherheit bei der Kalibrierung von Beschleunigungsaufnehmern**

Im Fachlaboratorium 8.31 wurde in Kooperation mit dem Fachlaboratorium 1.22 ein Verfahren entwickelt, das durch Wahl geeigneter Auswertzeitfenster bei der Schätzung der Parameter sinusförmiger Beschleunigungen zu einer erheblichen Verringerung der Messunsicherheit bei niederfrequenten Störungen (z. B. Gebäudevibrationen) führt sowie den Einfluss von Netzstörungen bei Hochfrequenzkalibrierungen ( $f > 5$  kHz) stark verringert.

**Metrologie für die Wirtschaft****Kooperation PTB – BRUKER MEDICAL GmbH**

Zwischen der PTB und der BRUKER MEDICAL GmbH wurde eine auf drei Jahre (1.7.2001 bis 30.6.2004) befristete, vertraglich geregelte und vom BMWi im Rahmen des Programms „Leistungssteigerung Infrastruktur“ finanziell unterstützte Zusammenarbeit auf dem Gebiet applikationsoptimierter adaptiver Mehrelement-Sende-/Empfangsspulen für die Hochfeld-(3 Tesla)-Kernspintomographie/In-vivo-Spektroskopie ausgewählter Körperregionen aufgenommen.

**Kooperation zwischen der PTB und der Firma PICO QUANT GmbH**

Mit der Firma PICO QUANT GmbH wurde eine auf 2,5 Jahre (1.7.2001 bis 31.12.2003) befristete, vertraglich geregelte und vom BMWi im Rahmen des Programms „Leistungssteigerung Infrastruktur“ finanziell unterstützte Zusammenarbeit mit dem Ziel der Entwicklung eines Prototypen eines mehrkanaligen Laserimpuls-Mammographen für die klinische Forschung aufgenommen.

**Untersuchungen von Analog-Digital-Umsetzer-Baugruppen**

Im Rahmen eines Prüfauftrages und einer Kooperation wurden für zwei Analog-Digital-Umsetzer (ADU) so genannte „Evaluation

Boards“ entwickelt, um die entsprechenden ADU bei ihrer Prüfung in der PTB mit der notwendigen Genauigkeit anzusteuern. Der ADU-Messplatz der PTB wurde im Jahre 2001 vom Standort Berlin-Friedrichshagen nach Berlin-Charlottenburg verlagert.

**Drahtlose Übertragung von Messdaten**

Im Fachlaboratorium 8.32 wurden in Zusammenarbeit mit Partnern aus der Industrie neue Konzepte für die Funkdatenübertragung entwickelt und von Industriepartnern exemplarisch realisiert. Diese Konzepte wurden auf der BFT-Messe im Mai 2001 vorgestellt und werden derzeit für unterschiedliche Anwendungen untersucht.

**Euro-Einführung an Geldspielautomaten**

In Vorbereitung des EURO als Zahlungsmittel sind für die Automatenwirtschaft eine Reihe von Umstellungen erforderlich. Das Fachlaboratorium 8.33 hat in Zusammenarbeit mit der Automatenindustrie für die zusätzlichen Prüfungen Lösungen gefunden, die dem besonderen Anlass unter Berücksichtigung der Anforderungen der Spielverordnung gerecht werden.

**Metrologie für die Gesellschaft****Konzentrationsbestimmung veränderter weißer Blutzellen bei Malaria-Patienten**

In Kooperation mit der Medizinischen Klinik, Schwerpunkt Infektiologie der Charité, Virchow-Klinikum wurden Blutproben von Malaria-Patienten durchflusszytometrisch untersucht, um seltene weiße Blutzellen (Monozyten) nachzuweisen, die durch die Aufnahme des Malaria-Pigmentes Hämozoin verändert wurden. Es wurden relative Konzentrationen von Monozyten mit Hämozoin von  $3 \cdot 10^{-5}$  bis  $10^{-2}$  bezogen auf alle weißen Blutzellen bestimmt.

**Lasergestützte Fluoreszenzdiagnostik von rheumatischen Erkrankungen**

Mit dem Institut für Radiologie der Charité, Humboldt-Universität zu Berlin wurde eine Zusammenarbeit auf dem Gebiet der Fluoreszenzdiagnostik mit dem Ziel begonnen, eine neue Methode zur Detektion und Beurteilung entzündlich rheumatischer Gelenkveränderungen unter Einsatz optischer Kontrastmittel zu entwickeln.

**In-vivo-NMR-Spektroskopie von Neurotransmittern mit gekoppelten Spinsystemen**

In Zusammenarbeit mit der Psychiatrischen Klinik der Freien Universität Berlin wurde damit begonnen, die Konzentration des Neurotransmitters Glutamat in ausgewählten Hirnregionen mit Hilfe der In-vivo-NMR-Spektroskopie zu bestimmen. Dazu wurde eine spezielle Multiquantenfilter-Sequenz zur Unterdrückung von Singulettresonanzen entwickelt, auf dem 3-Tesla-MR-Tomographen der PTB implementiert und eingesetzt.

**Beurteilung der Vitalität von Herzmuskelgewebe mittels Magnetokardiographie**

In einem vom BMBF geförderten, in Zusammenarbeit mit dem Universitätsklinikum Benjamin Franklin (FU Berlin) und der Franz-Vollhard-Klinik der Charité durchgeführten Pilotprojekt konnte bei einigen Patienten mit Verschluss von Herzkranzgefäßen (Stenose) mit Hilfe der Magnetokardiographie nicht-invasiv zwischen Patientengruppen mit vitalem Herzgewebe, mit vernarbtem Herzgewebe und mit Herzgewebe, das teilweise vital, teilweise vernarbt war, unterschieden werden. Als Vergleichsmethode (Goldstandard) wurde die Positronenemissionstomographie herangezogen.

**Magnetoenzephalographie unter visueller Stimulation**

Das von der DFG geförderte Projekt „Analyse von Kurz- und Langzeitplastizität bei der Verarbeitung komplexer visueller Reize im inferotemporalen Kortex“ untersucht mit der Magnetoenzephalographie (MEG) die Verarbeitung visueller Reize im Gehirn. Ein Ziel des Projekts ist die effiziente und statistisch zuverlässige Auswertung von experimentellen Multikanal-Messdaten.

**DC-Magnetenzelephalogramme**

Im Rahmen eines gemeinsamen DFG-Projekts zur Entwicklung von Messtechnik für niederfrequente Hirnfunktionen (DC-MEG) wurde in Zusammenarbeit mit Neurologen des Universitätsklinikums Benjamin Franklin sowie der Charité erstmals eine Simultanmessung von DC-MEG und Nahinfrarot-Spektroskopie (NIRS) durchgeführt.

**EKG-Auswertung über Internet**

Die im Fachlaboratorium 8.21 entwickelte Methode zur Analyse von EKG durch Mustererkennung unter Einsatz einer EKG-Signal-

datenbank wurde an 8500 12-kanaligen EKG-Messungen von Patienten mit unterschiedlichen kardiologischen Erkrankungen und herzgesunden Personen erfolgreich getestet. Es wurde eine Netzwerkversion entwickelt, die im Internet angeboten werden kann. Auf der Basis dieser Internetlösung wird derzeit eine Zusammenarbeit mit einem Industriepartner und mit medizinischen Einrichtungen aufgebaut.

**Datenanalyse für In-vivo-NMR-Spektroskopie**

Die Arbeiten zur Verbesserung der Auswertemethoden für die Analyse von In-vivo-NMR-Spektren wurden mit der Einbeziehung von gemessenen Phantomspektren bei der Modellierung von NMR-Spektren fortgesetzt. Als Ergebnis können nun auch die Konzentrationen von solchen Metaboliten im Gehirn bestimmt werden, bei denen bisherige Standardverfahren scheiterten.

**Neue Aufgaben zur Datenanalyse für MEG/EEG aufgenommen**

Im Zusammenhang mit der Inbetriebnahme verbesserter hochauflösender Vielkanal-SQUID-MEG-Messsysteme im Fachlaboratorium 8.21 hat das Fachlaboratorium 8.31 im Jahre 2001 die Entwicklung von Datenanalyseverfahren für Kurzzeitsignale mit niedrigem Signal/Rauschverhältnis aufgenommen.

**Entwicklung und Erprobung optischer Kontrastmittel**

Es wurden von der Schering AG Berlin entwickelte, neue, spezifisch bindende optische Kontrastmittel hinsichtlich ihrer Eignung für die Fluoreszenzbildgebung zum Nachweis von Tumoren und deren Vorstufen sowie von entzündlichen Gewebeveränderungen untersucht.

**Nachweis von Tumoren und deren Metastasen anhand körpereigener Fluoreszenzfarbstoffe**

Im Rahmen eines bewilligten DFG-Forschungsvorhabens werden in Zusammenarbeit mit der Robert-Rössle-Klinik, Berlin-Buch, Mechanismen der Anreicherung von körpereigenem Protoporphyrin IX in Tumoren und deren Metastasen untersucht. Damit sollen Möglichkeiten zum nicht-invasiven Nachweis von Krebserkrankungen z. B. anhand der laserinduzierten Fluoreszenz erforscht werden.

**Leitfaden zu messtechnischen Kontrollen von Medizinprodukten mit Messfunktion**

Der 1998 erstmals erschienene Leitfaden zu messtechnischen Kontrollen von Medizinprodukten mit Messfunktion (LMKM) wurde in einer 2. Ausgabe aktualisiert und erweitert. Er ist über das Internet ([www.ptb.de](http://www.ptb.de)) im Bereich „Publikationen“ unter „Download“ zu bekommen.

**Normal zur Prüfung von Impressionstonometern**

Das Fachlaboratorium 8.22 hat ein neues Normal zur Prüfung von Impressionstonometern (Geräte zur Bestimmung des Augeninnendrucks) entwickelt. Das Normal zur messtechnischen Kontrolle nach den Vorschriften der Medizinprodukte-Betreiberverordnung basiert auf einer modifizierten elektronischen Waage und einer elektronischen Längenmessung. Ein deutscher Hersteller zeigt Interesse am Bau dieses Normals.

**Ringversuch an NCT-Augentonometer-Prüfeinrichtungen**

Non-Contact-Tonometer (NCT) werden fast ausschließlich mit NCT-Prüfeinrichtungen messtechnisch kontrolliert, die in der PTB entwickelt wurden. Im Rahmen eines Ringversuchs wurden 13 der ca. 15 NCT-Prüfeinrichtungen, die für die messtechnischen Kontrollen nach den Vorschriften der Medizinprodukte-Betreiberverordnung eingesetzt werden, untersucht.

**Neues Verfahren der messtechnischen Kontrolle von NCT-Augentonometern**

Für die messtechnische Kontrolle eines speziellen NCT-Augentonometers wurde ein neues Verfahren geprüft und als geeignet eingestuft, bei dem Kunststoffkalotten als Phantome eingesetzt werden.

**Allgemeine Nachrichten**

**Softwareprüfstelle der PTB akkreditiert**

Im Februar 2001 ist der Akkreditierungsprozess der Softwareprüfstelle im Fachbereich 8,3 mit der zunächst auf fünf Jahre befristeten Akkreditierung als Prüflaboratorium gemäß DIN EN ISO/IEC 17 025 durch die DATech (*Deutsche Akkreditierungsstelle Technik e. V.*) abgeschlossen worden.

**Umzug in den Hermann-von-Helmholtz-Bau**

Am 6. Dezember 2000 ist das Fachlaboratorium 8.21 in den HvH-Bau umgezogen. Zwei neue magnetischen Abschirmräumen bieten hier eine einzigartige messtechnische Infrastruktur für die Arbeit des Fachlaboratoriums. Der erste (magnetisch und akustisch geschirmte) Raum ist mit einem kommerziellen MEG-Ganzkopfsystem ausgestattet und wird für Untersuchungen der Hirnfunktion eingesetzt. Der zweite (aktiv und passiv magnetisch geschirmte) Raum wurde am Ende des Jahres 2001 abgenommen.

**Science Fair Berlin**

Im Rahmen der „Langen Nacht der Wissenschaften“ fand am 15. September eine Forschungsausstellung der Freien Universität am Breitscheidplatz in Berlin statt. Das Fachlaboratorium 8.21 der PTB beteiligte sich an der Science Fair mit einem Stand, an dem zusammen mit dem Universitätsklinikum Benjamin Franklin gemeinsame Forschungsarbeiten zur Aufzeichnung biomagnetischer Signale vorgestellt wurden.

**Einrichtung des thematischen Netzwerkes MEDPHOT**

Zum 1.1.2001 hat das von der EU geförderte thematische Netzwerk „Optical Methods for Medical Diagnosis and Monitoring of Diseases“ (MEDPHOT) die Arbeit aufgenommen. Das Fachlaboratorium 8.12 ist Partner in diesem Netzwerk mit insgesamt 20 Teilnehmern aus sieben europäischen Ländern.

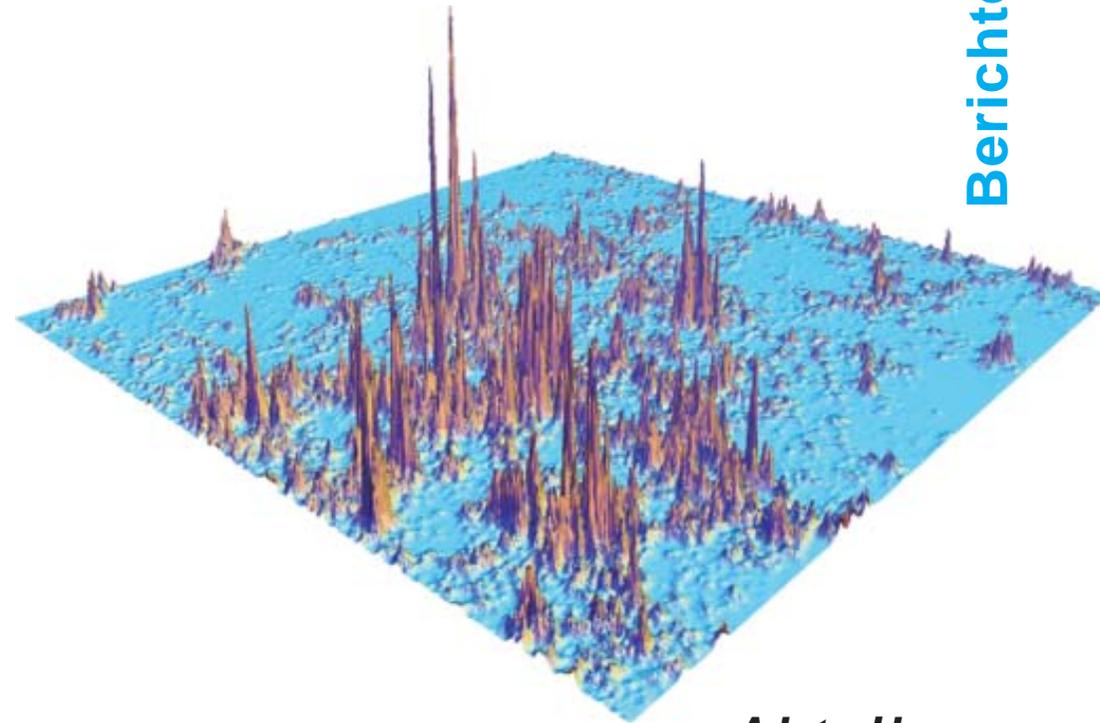
**Kompetenznetzwerk OpTec BB eingerichtet**

In dem vom *Bundesministerium für Bildung und Forschung* (BMB+F) ausgeschriebenen bundesweiten Wettbewerb für Kompetenznetze „Optische Technologien“ gehört der eigens gegründete Verein OpTec-Berlin-Brandenburg e. V. (OpTec BB) zu den sieben Siegern. Das Fachlaboratorium 8.12 ist Mitglied im OpTec BB im Schwerpunkt Biomedizinische Optik (weitere Informationen unter [www.optecbb.de](http://www.optecbb.de)).

**Fachbereich 8.3 in Berlin-Charlottenburg zusammengeführt**

Der Fachbereich 8.3, der über zehn Jahre auf die Standorte in Berlin-Friedrichshagen und Berlin-Charlottenburg verteilt war, ist mit dem Umzug des Fachlaboratoriums 8.32 nach Charlottenburg im Rahmen der Standortkonzentration Berlin zusammengeführt worden.

**Wissenschaftlich-technische Querschnittsaufgaben**



**Abteilung**



# Wissenschaftlich-technische Mittsallgaben

Die *Abteilung Q* nimmt vielfältige Aufgaben in allen vier 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

In neun Projekten mit theoretischer, experimenteller oder praxisnaher Ausrichtung werden Themen behandelt, die einen weiten Bogen von metrologischen Grundsatzfragen bis zur experimentellen und theoretischen Grundlagenforschung in Festkörper- und Materialphysik überspannen. Es sind dies theoretische Arbeiten zum Quanten-Hall-Effekt und über Quantenflüssigkeiten sowie

Titelbild  
Quanten-Hall-Effekt: Momentaufnahme eines am Stromtransport beteiligten Elektrons. (Die Längenskala ist typisch 200 nm.)  
Zum grundlegenden Verständnis des Quanten-Hall-Effekts gehört die Frage nach dem Einfluss der Unordnung auf die Breite der quantisierten Plateaus im Hall-Widerstand. Insbesondere ist das Verschwinden der im Bild dargestellten stromtragenden elektronischen Zustände bei sehr großer Unordnung oder, alternativ, im Limes kleiner magnetischer Flussdichten von großer Bedeutung. Abgebildet ist ein Eigenzustand mit Energie aus der Mitte des untersten Landaubandes für ein zweidimensionales System. Die räumliche Struktur zeigt eine ausgeprägte Selbstähnlichkeit. Dies bedeutet, dass die stromtragenden Zustände weder lokalisiert noch ausgedehnt, sondern multifraktal sind. In einem Gittermodell mit räumlich korrelierter Unordnung verschieben sich die multifraktalen Zustände zu höheren Energien hin, wenn die Unordnung vergrößert wird. Sind alle stromtragenden elektronischen Zustände über dem Fermi-Niveau angelangt, verschwindet der Quanten-Hall-Effekt und das System wird zum Isolator.

Praktisches wie Definition und Bestimmung von Messunsicherheiten oder Internetanwendungen für die Metrologie. Die experimentellen Arbeiten betreffen die Präzisionsbestimmung der Avogadro-Konstanten, prompte (n- $\gamma$ )-Analyse, Materialuntersuchungen mit Neutronen sowie die Untersuchung von Grenzflächen.

Oft bündeln diese Projekte Arbeiten quer durch mehrere Fachabteilungen. Umgekehrt verstehen sich die Mitarbeiter der *Abteilung Q* als kompetente Ansprechpartner für alle Kollegen aus der PTB, wenn es um Fragen aus der theoretischen Physik geht, um die Ermittlung der Messunsicherheiten bei komplexen Messverfahren oder um spezifische metrologische Anwendung des Internet.

Im Berichtsjahr wurden drei Promotionen abgeschlossen, zwei theoretische Arbeiten über den Quanten-Hall-Effekt und über Anregungen in supraflüssigem Helium, sowie eine experimentelle Studie über die (n- $\gamma$ )-Analyse von Isotopenhäufigkeiten. Während einer der frisch gebackenen Doktoren in der PTB bleibt, kehren die beiden anderen als postdocs in ihre Heimatländer Polen und Thailand zurück.

Nach längeren Vorarbeiten wurden zwei Querschnitts-Projekte neu eingerichtet. Unter dem Titel „Charakterisierung von Grenzflächen“ werden dezentrale Arbeiten in verschiedenen Fachbereichen koordiniert. Verschiedenartige Techniken zum Studium von Oberflächen und Grenzflächen zwischen Festkörpern sollen verglichen und kohärent weiter entwickelt werden, um so zu gemeinsamen Standards und Normalen zu kommen: Reflektometrie mit Röntgentralen und Neutronen, Photolumineszenz, Elektronenmikroskopie, Raster-Kraftmikroskopie. Als typische Proben – auch in der PTB hochaktuell – bieten sich z. B. Oberflächen von Halbleiterheterostrukturen an.

Das neue Projekt „Internetanwendungen für die Metrologie“ versteht sich als Vorreiter, die rapide wachsenden Möglichkeiten des Internets auszuloten, um sie für kommunikative und technische Abläufe zu nutzen. Schon letztes Jahr wurde an dieser Stelle berichtet, wie das Neutronendiffraktometer „POLDI“ am Reaktor in Geesthacht von einem Rechner in der PTB über das Internet ausgelesen und auch gesteuert wird. Dies lässt sich leicht auf Routine- und Dauermessungen verallgemeinern. Es ist aber auch durchaus vorstellbar, dass eines nicht zu fernem Tages z. B. im Rahmen des DKD, routinemäßige Kalibrierungen via Online-Verbindung über das Internet ohne Anwesenheit des Experten durchgeführt bzw. überwacht werden. Sehr weit fortgeschritten sind schon praktische Versuche mit Videokonferenzen – zwischen der PTB in Braunschweig und Berlin, einmal schon bis Japan. Weiter wird an der konkreten Einführung der digitalen Signatur gearbeitet.

Keine Messung ohne Angabe der Messunsicherheiten – eigentlich sollte dies seit C. F. Gauß' Schrift von 1823 „Theoria combinationis observationum erroribus minimis obnoxiae“ selbstverständlich geworden sein. Heute sind die gängigen Verfahren zur Ermittlung von Unsicherheiten in dem ISO-Leitfaden „Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement“, dem GUM, festgehalten. Mitarbeiter der Abteilung erläutern diese Methoden praxisnah in Veröffentlichungen und Vorträgen. CEN (Europäisches Komitee für Standardisierung) und EA (Europäische Kooperation für Akkreditierung) haben im letzten Jahr zu diesem Themenkreis neue Arbeitsgruppen eingerichtet, die eine Umfrage über Handhabung der Messunsicherheit in der Praxis durchführen. Der dazugehörige Fragebogen wurde in der PTB erarbeitet. Die Fragen sollen klären, anhand welcher Normen oder Dokumente die Unsicherheit bei Kalibrier- und Prüfaufgaben bestimmt wird, wie die Anwender die Brauchbarkeit dieser Normen und Dokumen-

te für die Praxis beurteilen und inwieweit sie mit dem GUM konform sind. Die Auswertung soll als Basis dienen, um weitere Schritte zur Verbreitung und Akzeptanz des GUM in Europa zu unternehmen.

Der quantisierte Hall-Widerstand stellt heute die präziseste Verkörperung der elektrischen Widerstandseinheit Ohm dar. Dies erklärt die stetigen und intensiven Bemühungen um ein tieferes theoretisches Verständnis des Quanten-Hall-Effekts (QHE). Der QHE beschreibt das sprunghafte Verhalten des Hallwiderstands eines ungeordneten zweidimensionalen Elektronengases in hohem Magnetfeld bei tiefer Temperatur. Mit zunehmender Unordnung oder, alternativ, kleinerem Magnetfeld wird das Elektronengas zum Isolator. Zur Beschreibung dieses Übergangs gibt es widersprüchliche Modellvorstellungen, je nachdem ob die Ortsvariable diskretisiert oder kontinuierlich behandelt wird. In einer gerade erschienenen Arbeit zum Übergang von der QH-Phase zum Isolator wurden diese Widersprüche dadurch aufgelöst, dass die Unordnung räumlich korreliert behandelt wird. Damit wurde letztlich das Levitations-Modell bestätigt: Mit abnehmender magnetischer Flussdichte verschieben sich die wenigen stromtragenden Zustände über das Fermi-Niveau hinweg, wo sie dann nicht mehr besetzt sind.

Kernspinresonanz wird laut Lehrbuch durch die Bloch-Gleichungen beschrieben, allerdings mit der kleinen Einschränkung, dass sie nur bei hoher Temperatur  $kT \gg \mu_B$  bzw. nur für Spin 1/2 – dann bei jeder Temperatur – streng gelten. In der theoretischen Gruppe wurden nun in Zusammenarbeit mit einem russischen Gast die Bloch-Gleichungen verallgemeinert. Ausgehend von der mikroskopischen Quantentheorie gelang es, ein allgemein gültiges geschlossenes lineares System von Relaxationsgleichungen herzuleiten, das für beliebige Spins, bei beliebiger Temperatur und sogar bei stationärer Umgebung im

Nichtgleichgewicht gültig ist. Die Gleichungen enthalten generell zwei Zeitkonstanten und ergeben im Grenzfall wieder die Bloch-Gleichungen. Mit diesem Formalismus sollten sich Spinrelaxation an Quanten-Hall-Ferromagneten (typisch große Spins bei tiefer Temperatur) deuten lassen.

Die Bose-Einstein-Kondensation – heute wieder höchst aktuell – ist der tiefe Grund für Supraleitung und für die Suprafluidität von  $^4\text{He}$ . Die elementaren Anregungen in Helium sind mit Neutronen recht sorgfältig gemessen, ihre theoretische Beschreibung ist allerdings so einfach nicht. Grund dafür ist die relativ starke (abstoßende) Wechselwirkung der Atome untereinander, die das Vielteilchenproblem praktisch fast unberechenbar macht. Eine soeben abgeschlossene Promotion formuliert dazu einen Formalismus, der auf einem mikroskopischen Ansatz von Gavoret und Nozières aufbaut, aber zusätzlich explizit das Bose-Kondensat enthält. Weiter ist hervorzuheben, dass nicht nur, wie meist üblich, Anregungsenergien ausgewertet werden. Mit Hilfe der Greenschen Funktionen wird tatsächlich  $S(q, \omega)$  berechnet. Mit phänomenologischem Input ergeben sich so die Streufunktionen, die Ein- und Mehr-Phonon bzw. -Roton-Anregungen wiedergeben und schon recht schön den Messungen ähneln. Vielleicht ein hoffnungsvoller Schritt zu einer begründeten, detailgenaueren Theorie?

Ganz erhebliche experimentelle Anstrengungen gelten dem Projekt, die Avogadro-Konstante  $N_A$  genau zu bestimmen. Ziel ist, eines Tages das Urkilogramm durch eine Definition auf der Basis atomarer Massen zu ersetzen. Große Fortschritte sind schon erzielt, die makroskopischen Parameter wie Masse, Volumen, Dichte, Oberflächenbeschaffenheit einer einkristallinen Si-Kugel von 1 kg sowie deren mikroskopische Parameter Atomvolumen und molare Masse, d. h. Isotopenhäufigkeit, Verunreinigungen, Fehlstellen, genau zu vermessen. Zurzeit setzt die Isotopenhäufigkeit (mit einer relativen Unsicherheit von einigen  $10^{-5}$ ) die Grenze der Unsicherheit oberhalb  $10^{-7}$ . Vielleicht helfen hier die Verwendung von angereichertem  $^{28}\text{Si}$  und/oder die (n- $\gamma$ )-Analyse weiter. Die energieselektive Analyse der durch Absorption thermischer Neutronen entstehenden  $\gamma$ 's gestattet, die Isotope in den fraglichen Si-Kugeln zerstörungsfrei zu analysieren. Wie weit die Genauigkeit in der Isotopenkonzentration getrieben werden kann ist zurzeit Gegenstand systematischer Untersuchungen.

Der Spin-off der (n- $\gamma$ )-Analyse macht dagegen schnellere Fortschritte. Gemeinsam mit der Firma „Kali und Salze“ wird ein Analyseverfahren entwickelt, bei dem die im Bergbau geförderten Salze mit Neutronen aus einem kommerziellen mobilen Neutronengenerator bestrahlt und die dabei entstehenden  $\gamma$ -Energien

in einem Ge-Detektor (Bild 1) nachgewiesen werden. Diese Online-Analyse der chemischen Zusammensetzung direkt am Förderband soll dann helfen, die geförderten Salze noch untertage geeignet vorzusortieren.

Als weiterer Spin-off des Avogadro-Projekts wird die Röntgeninterferometrie weiterentwickelt mit dem Ziel, ein Fabry-Perot-Interferometer für Röntgenstrahlen und sichtbares Licht zu bauen. Als Vorstudien hierzu wurde am Synchrotron HasyLab in Zusammenarbeit mit der *Universität Hamburg* in Rückreflexion an Si die Wellenlänge der bekannten  $^{57}\text{Fe}$ -Mößbauerlinie neu zu 86,025 474 (16) fm bestimmt.

Grundlagenforschung mit Neutronen wurde am Diffraktometer POLDI am Forschungsreaktor in Geesthacht weitergeführt. Schwerpunkt ist hierbei, das Magnetisierungs- und Demagnetisierungsverhalten von ferromagnetischen Legierungen mit frustrierten Spins mit Hilfe der Depolarisation von Neutronen zu untersuchen (Bild 2). Unter dem Stichwort „Instrumentelle Entwicklung“ sei über ein Ergebnis berichtet, das aus der Kooperation mit einem Gast aus Prag hervorging. Wegen seiner Diamantstruktur ist in Si der (222)-Bragg-Reflex aus Symmetriegründen verboten – es sei denn, zwei sukzessive erlaubte Reflexe passen über Umwegenung gerade zum (222)-Reflex zusammen. Dies gilt allerdings nur für ganz spezifische Orientierungen und

nur für wohldefinierte Wellenlängen. Dieser „trotz-Verbot“- (222)-Reflex wurde in leicht gebogenen Si-Kristallen sichtbar gemacht. Vielleicht eröffnet sich hier die Möglichkeit für die Metrologie, mit Neutronen präzise Wellenlängenmarker zu erzeugen, deren Wellenlänge nicht wie beim klassischen Bragg-Reflex vom Winkel abhängt, sondern nur durch die Gitterkonstante des Si gegeben ist.

### Messtechnik für die Wirtschaft

Die bisher als Referat *Akkreditierung* in die Abteilung Q integrierte Geschäftsstelle des *Deutschen Kalibrierdienstes* (DKD) ist seit dem 1. Juli dieses Jahres zu einer eigenständigen Organisationseinheit umstrukturiert, um ihre Unabhängigkeit und Unparteilichkeit auch Außenstehenden transparent zu machen. Über die Arbeiten der Akkreditierungsstelle wird daher jetzt an anderer Stelle berichtet (s. S. 26), hier soll lediglich auf ihre internationale Einbindung eingegangen werden.

Die PTB hat die Zusammenarbeit von nationalen Akkreditierungsstellen für Kalibrierlaboratorien von deren ersten Anfängen in der 1975 gegründeten „Western European Calibration Cooperation“ (WECC) bis zu den heute etablierten Organisationen „European co-operation for Accreditation“ (EA) und „International Laboratory Accreditation Cooperation“ (ILAC) maßgeblich mitgestaltet. Das in der EA und ihren Vorläuferorganisationen für technische Fragen zuständige Kommi-



Bild 1: Gamma-Spektroskopie untertage im Bergwerk Neuhofer-Ellers von der Firma „Kali und Salz“. Auf der linken Seite befindet sich der Neutronengenerator (Polyethylen zur Moderation der Neutronen), in der Mitte das Transportband mit dem Salz und rechts der HP-Ge-Detektor mit Elektronik.

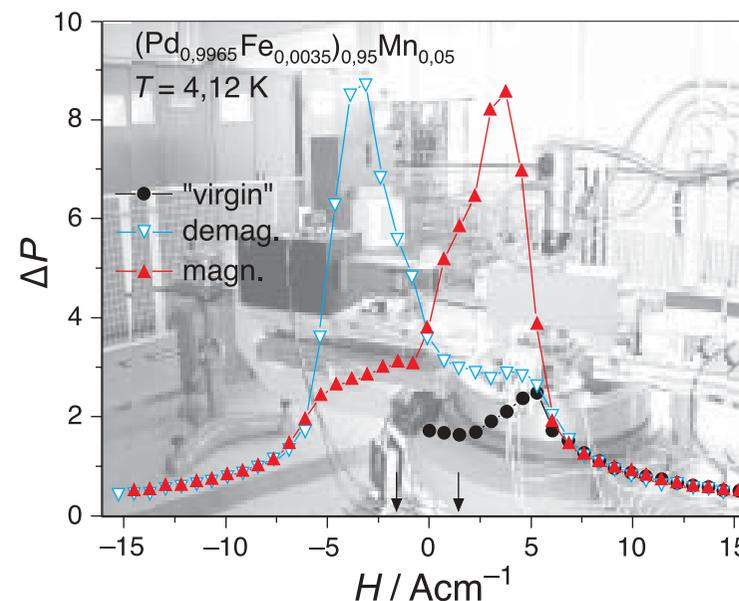


Bild 2: Neutronendiffraktometer POLDI am Forschungsreaktor der GKSS in Geesthacht. Eine typische Messkurve zeigt die Depolarisation  $\Delta P$  von Neutronen nach dem Durchgang durch eine ferromagnetische Legierung. Deutlich sichtbar wird die Hysterese beim Umpolen des Magnetfelds.

tee wird seit 1990 ununterbrochen von der PTB geleitet. Von seinen bisher 23 Sitzungen haben neun in der PTB stattgefunden, die letzte im September dieses Jahres (Bild 3). Durch intensive Mitarbeit bei der Ausarbeitung von Kalibrierrichtlinien und Organisation zahlreicher internationaler Vergleichsmessungen hat die PTB wesentlich zur Betonung der technischen Kompetenz von Kalibrierlaboratorien und zur Harmonisierung der Akkreditierungstätigkeit in Europa beigetragen. Wichtigste Ergebnisse sind Abkommen zur grenzüberschreitenden Anerkennung der von akkreditierten Laboratorien ausgestellten Kalibrier- und Prüfscheine, zu deren Erstunterzeichnern in Europa (WECC, 1989) und weltweit (ILAC, 2000) jeweils der DKD gehörte. Diese Anerkennung ist von großer wirtschaftlicher Bedeutung, nicht nur für die im DKD vertretenen ca. 90 deutschen Messgerätehersteller, sondern auch für alle industriellen Nutzer dieser Kalibrierleistungen, die zur internationalen Wettbewerbsfähigkeit über ein zertifiziertes Qualitätsmanagement-System nach ISO 9000 verfügen müssen.

### Messtechnik für die Gesellschaft

Nach der Veröffentlichung des „Vorschlags für eine Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates über Messgeräte“ („Measuring Instruments Directive“ – MID) im September 2000 wurde der Entwurf im Berichtsjahr in verschiedenen Sitzungen der Gruppe „Technische Harmonisierung“ im Rat

der Europäischen Union weiterentwickelt. Die Interessen der deutschen Industrie und der Verbraucher wurden hierbei von der PTB vertreten.

Die Arbeiten wurden maßgeblich unterstützt von der Arbeitsgruppe 8 der WELMEC (European Cooperation in Legal Metrology). Dazu wurden für die betroffenen Messgerätearten Untergruppen geschaffen, in denen neben der PTB und anderen Metrologiebehörden auch die europäischen Industrieverbände mitarbeiten konnten.

Trotz der vielen Änderungen gegenüber dem Text der Kommission und weiterer Änderungsvorschläge des Europäischen Parlaments wird im Jahr 2002 mit einem gemeinsamen Standpunkt gerechnet.

Zur internationalen Harmonisierung des gesetzlichen Messwesens besteht in der „Organisation Internationale de Métrologie Légale“ (OIML) ein Zertifizierungssystem mit dem Ziel der gegenseitigen Anerkennung gleichwertiger Zulassungsprüfungen für Messgeräte. Die in diesem System herausgegebenen Zertifikate bescheinigen die Konformität einer bestimmten Messgerätebauart mit den Empfehlungen der OIML. Zur Lösung des Problems der Gleichwertigkeit der Prüfergebnisse wurde der Entwurf eines „Mutual Acceptance Arrangement on OIML Type Evaluations“ weiterentwickelt.

Wegen der Option, anstelle einer Akkreditierung und einer Begutachtung des Prüflaboratoriums durch Fachexperten vor Ort (peer assessment) auch die von der PTB favorisierte Selbsterklärung als geeigneten Vertrauensnachweis für die Kompetenz der Prüflaboratorien zuzulassen, fand der Entwurf noch nicht die notwendige breite Zustimmung. Aus diesem Grunde sollen nunmehr auch erfolgreich durchgeführte Ringvergleiche an Messgerätemodellen als Kompetenznachweis berücksichtigt werden können. In den weiteren Diskussionen wird die PTB für eine Vereinbarung eintreten, die mehrere alternative Verfahren zum Nachweis der Kompetenz erlaubt.

### 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. Über dreißig vom *Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (BMZ)* finanzierte Projekte fördern den Abbau technischer Handelshemmnisse, den Aufbau von Systemen der Konformitätsprüfung mit den Komponenten Mess-, Normen-, Prüf- und Qualitätswesen, Akkreditierung und Zertifizierung (MNPQ) und Umweltschutz. Projektpartner in mehr als zwanzig Ländern Asiens, Afrikas, Amerikas und Europas sind überwiegend staatliche, für den MNPQ-Bereich zuständige Institutionen und Organisationen.

Die teilweise raschen Veränderungen auf den regionalen und internationalen Märkten im Zuge der Globalisierung, die mit der Öffnung und marktwirtschaftlichen Orientierung der Volkswirtschaften vieler Entwicklungs- und Schwellenländer sowie der Transformationsländer verbunden sind, stellen diese Länder vor neue Herausforderungen. Der Fachbereich *Technische Zusammenarbeit* der PTB hat sich darauf eingestellt. Bemühungen einer stärkeren regionalen Zusammenarbeit und einer intensiveren Beteiligung am Welthandel werden unterstützt. Das wird an den folgenden neuen Projekten erkennbar.

Für westafrikanische Länder und insbesondere für Mitgliedsstaaten der „Westafrikanischen Wirtschafts- und Währungsunion“, UEMOA, (Benin, Burkina Faso, Elfenbeinküste, Guinea-Bissau, Mali, Niger, Senegal, Togo) wurde ein Projekt zur Förderung des Mess- und Prüfwesens konzipiert. Mittel für die Durchführung in Höhe von 2 Mio. DM für die erste Phase von drei Jahren wurden vom BMZ bewilligt. Ziel ist der Auf- und Ausbau regionaler und nationaler Strukturen des Mess- und Prüfwesens zur Stärkung der Wirtschaft der Region. Dieses Projekt komplettiert ein von der Europäischen Union (EU) gefördertes Projekt für die Region zum Aufbau von Akkreditierungs- und Normensystemen und zur Förderung des Qualitätswesens. Über das Projekt der PTB wurden Vertreter der UEMOA anlässlich ihres Besuchs in der PTB informiert. Eine Vereinbarung über künftige Zusammenarbeit zwischen PTB und UEMOA (Bild 4, umseitig) wurde geschlossen.

Da die „United Nations Industrial Development Organization“, UNIDO, Wien, das oben genannte EU-Projekt durchführen wird, erfolgte eine gegenseitige Information über beide Projekte anlässlich eines Besuchs von UNIDO-Vertretern in der PTB. Eine enge Zusammenarbeit zwischen beiden Projekten, die sich thematisch ergänzen, wurde vereinbart.

Ein weiteres neues Projekt hat die Unterstützung des Aufbaus regionaler und nationaler MNPQ-Strukturen im asiatischen Raum zum Ziel. Projektpartner sind die „South Asian Association for Regional Cooperation“, SAARC, und ihre Mitgliedsländer Pakistan, Indien, Nepal, Butan, Bangladesch, Sri Lanka und die Malediven sowie die „Association of South-East Asian Nations“, ASEAN, zu der Singapur, Malaysia, Indonesien, Thailand, Brunei Darusalam, Laos, Kambodscha, Vietnam, Myanmar und die Philippinen gehören. Kontakte zu den für MNPQ zuständigen Komitees der Regionen wurden aufgenommen und erste Verabredungen getroffen. Das Projektkonzept sieht eine Einbindung ehemaliger und aktueller Projektpartner in Indien und Thailand bei der Umsetzung von Maßnahmen vor. Erste Gespräche ergaben, dass diese Partner an einer solchen Zusammenarbeit sehr interessiert sind. Vom BMZ wurden 3 Mio. DM für die erste Phase von vier Jahren bewilligt.



Bild 3: Teilnehmer an der Tagung des EA Laboratory Committee am 10./11. September 2001 in der PTB in Braunschweig

### Qualitätsmanagement

Die Umstellung des QM-Systems der gesamten PTB auf die Anforderungen der DIN EN ISO/IEC 17 025 wurde mit der Freigabe einer neuen QM-Dokumentation abgeschlossen. Sie umfasst das QM-Handbuch der PTB, 21 abteilungsübergreifende QM-Verfahrensweisungen, zehn abteilungsspezifische QM-Handbücher der PTB-Abteilungen 1 bis 8, Z und Q und die QM-Handbücher der ak-kreditierten Zertifizierungsstellen. Außerdem wird die Dokumentation durch ca. 1000 aufgabenspezifische Arbeitsweisungen vervollständigt.

Für die *Abteilung Q* wurde eine den äußerst verschiedenen Aufgaben angepasste QM-Organisation entwickelt, die jedoch in das QM-System der PTB integriert ist. Die entsprechende Dokumentation, die alle qualitätsrelevanten Leistungen umfasst, welche die *Abteilung Q* für ihre Kunden außerhalb und innerhalb der PTB erbringt, wurde in Kraft gesetzt. Das QM-System orientiert sich ebenfalls an den Forderungen der Norm sowie an den DFG-Empfehlungen zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis. Mit der Durchführung planmäßiger und systematischer interner Audits wird das QM-System der Abteilung fortlaufend weiterentwickelt und angepasst.

Im Rahmen von zwei Schulungen wurden insgesamt 60 Teilnehmer aus dem In- und Ausland in den Grundlagen des DKD-Akkreditierungssystems und im Ablauf von Akkreditierungsverfahren ausgebildet (Bild 5). Die Schulungsinhalte orientierten sich an den neuen Forderungen, die von akkreditierten Kalibrierlaboratorien im Zusammenhang mit der Einführung der DIN EN ISO/IEC 17 025 zu erfüllen sind. Neben der theoretischen Ausbildung umfassten die Schulungen insbesondere auch einen Praxisteil in Form von konkreten Begutachtungen eines speziellen Laboratoriums. Die Teilnahme an dieser Schulung ist eine notwendige Voraussetzung für die Bestellung zum Leitenden DKD-Begutachter.



Bild 4: In enger Zusammenarbeit mit der UEMOA und in Abstimmung mit der UNIDO wird das Projekt „Förderung des Mess- und Prüfwesens westafrikanischer Länder“ durchgeführt. Es ergänzt ein von der UNIDO durchgeführtes Programm der Europäischen Union zum Aufbau von Akkreditierungs- und Normungssystemen und zur Förderung der Qualität.

Bild 5: Teilnehmer einer Begutachterschulung beim Rollenspiel



## In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

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

### Grundlagen der Metrologie

#### Hochtemperaturentwicklung zum gebrochenzahligen Quanten-Hall-Effekt

Es wurde in einer Doktorarbeit das Temperaturverhalten eines Modells für den gebrochenzahligen Quanten-Hall-Effekt theoretisch untersucht.

#### Kernspinrelaxation für höhere Spinquantenzahl

In einer Kooperation mit einem Gastwissenschaftler wurden die Blochsch Relaxationsgleichungen für Kernspins verallgemeinert.

#### Dichtekorrelationen in supraflüssigem <sup>4</sup>He

Mit Hilfe von gekoppelten Dyson-Schwinger-Gleichungen berechnen wir den dynamischen Strukturfaktor  $S(q, \omega)$  von supraflüssigem <sup>4</sup>He in qualitativ guter Übereinstimmung mit experimentellen Neutronendaten.

#### Der Übergang von der Quanten-Hall-Phase in den Isolator

Theoretische Untersuchungen zum Quanten-Hall-Effekt haben ergeben, dass die stromtragenden elektronischen Zustände mit zunehmender Unordnung über das Fermi-Niveau gleiten und somit das System zu einem Hall-Isolator wird.

#### Vom Laboratorium zum Collaboratorium

Der Aufbau einer Infrastruktur in der PTB für die weitere Entwicklung der Metrologie und der Zusammenarbeit zwischen Laboratorien an verschiedenen Standorten mit Hilfe des Internet wird planmäßig vorangetrieben.

#### Hochpräzise Kristall-Orientierungsapparatur

Der Fehlwinkel zwischen Oberfläche und Netzebenen von Waferscheiben ist für die Halbleiterindustrie eine wichtige Kenngröße und muss auf SI-Einheiten rückgeführt werden. Auch im Bereich der metrologischen Anwendung von Silizium z. B. für die Neubestimmung der Avogadro-Konstanten spielt dieser Winkel eine bedeutende Rolle. Aus diesem Grund wurde eine in der PTB entwickelte und gebaute neue hochpräzise Kristall-Orientierungsapparatur in Betrieb genommen.

### Charakterisierung von Grenzflächen

Neue Methode zur zerstörungsfreien Untersuchung von Festkörpergrenzflächen an Dünnschichtsystemen als In-House-Methode für die PTB zur Verfügung gestellt.

### Messtechnik für die Gesellschaft

#### Vollversammlung für das Eichwesen 2001

Die Vollversammlung fand am 8./9. November 2001 im Bundesministerium für Wirtschaft in Berlin in Verbindung mit einer Internationalen Tagung zum Mess- und Eichwesen statt.

#### Datenbank für Bauartzulassungen der PTB (MITAC)

Seit Januar 2001 werden alle von den PTB-Zulassungslaboratorien erstellten Dokumente – Bauartzulassungen und Prüfscheine – in der Datenbank MITAC (Measuring Instruments Type Approval Certificates) hinterlegt.

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

Die Anzahl der Prüfstellen ist weiterhin leicht zurückgegangen.

#### Ansprechstelle für Auffälligkeiten im gesetzlichen Messwesen

Im Referat *Gesetzliches Messwesen* hat die zentrale Ansprechstelle der PTB für Auffälligkeiten im gesetzlichen Messwesen die Fachlaboratorien bei Beanstandungen und Nichtkonformitäten von Messgeräten durch Beratung und Anhörungsbesprechungen unterstützt.

#### COOMET-Arbeitsgruppe für gesetzliches Messwesen

Das zweite internationale Treffen fand in Minsk, Weißrussland vom 28. bis 30. März 2001 zusammen mit der Untergruppe „Software-Prüfungen für Messgeräte“ statt.

#### Internationale Tagung zum Mess- und Eichwesen

Am 7. und 8. November 2001 fand im Kongresszentrum des Bundesministeriums für Wirtschaft in Berlin eine internationale Tagung mit dem Thema „Neue Herausforderungen für das Mess- und Eichwesen in Europa“ statt.

### Internationale Angelegenheiten

#### Die technische Zusammenarbeit in Zahlen

Im Berichtsjahr wurden 18 Länder in vier Kontinenten durch 27 Projekte beim Aufbau ihrer MNPQ-Infrastruktur unterstützt. Der finanzielle deutsche Beitrag betrug ca. 7 Mio. DM. Etwa 120 Fachkräften aus 28 Ländern wurde eine Fortbildung in Fachinstituten in Deutschland und anderen Ländern (Bild 6) ermöglicht. Für mehr als 1000 Teilnehmer aus 45 Ländern wurden spezielle Fortbildungsseminare veranstaltet.

#### Zusammenarbeit mit Ländern Mittel- und Osteuropas

Die PTB unterstützt Länder Mittel- und Osteuropas mit Mitteln des BMWi bei der Kalibrierung ihrer Normale, der Teilnahme an Vergleichsmessungen, der Aufstellung und Begutachtung der „Measurement and Calibration Capabilities“ ihrer Staatsinstitute und durch Fortbildungsveranstaltungen.

#### TÜRKAK – In der Türkei entsteht ein Akkreditierungssystem

In einem neuen Projekt wird der Aufbau eines türkischen Akkreditierungssystems, das europäischen und damit auch internationalen Anforderungen genügt, unterstützt.

### Untersuchung zu Hörschäden bei Jugendlichen

Mit messtechnischer Unterstützung der PTB untersucht eine interdisziplinär zusammengesetzte Forschergruppe der *Technischen Universität Córdoba*, Argentinien, mit Hilfe der Hochtonaudiometrie die Auswirkungen von Lärm im Freizeitbereich auf das Hörvermögen von Jugendlichen.

#### Know-how-Transfer von Süd nach Nord in Brasilien

Die PTB fördert den Aufbau von Netzwerken lokaler Laboratorien im Nordosten Brasiliens mit dem Ziel, das Angebot mess- und prüftechnischer Dienstleistungen für die Industrie zu erhöhen. Sie wird unterstützt durch die Fundação CERTI, langjähriger Projektpartner im Süden des Landes.

#### Chilenisches Metrologienetz bietet weltweit anerkannte Kalibrierdienstleistungen

Die Referenzlaboratorien des Metrologienetzes in Chile für die Größen Masse, Temperatur und Kraft sind nach vierjähriger Aufbau- und Entwicklungszeit im Rahmen der technischen Zusammenarbeit im *Deutschen Kalibrierdienst* (DKD) akkreditiert worden.



Bild 6: Ausbildung spielt eine wichtige Rolle in allen Projekten der Technischen Zusammenarbeit. Hier werden Eichbeamte der Mongolei mit Regeln zur Fertigpackungskontrolle vertraut gemacht.

### **Die technische Zusammenarbeit mit Slowenien geht erfolgreich zu Ende**

Nach sechsjähriger Förderungszeit sind in Slowenien eine metrologische Infrastruktur und ein Akkreditierungssystem entstanden, die den gegenwärtigen wirtschaftlichen Erfordernissen weitestgehend entsprechen.

### **Infrastruktur**

#### **Wissenschaftliche Bibliotheken**

Die Online-Präsenz im PTB-Intranet konnte um den Bibliothekskatalog der Berliner PTB-Bibliothek erweitert werden; dagegen musste vor der Aufgabe des PTB-Standorts Berlin-Friedrichshagen die dortige Teilbibliothek aufgelöst werden.

#### **QM-System der PTB erfolgreich präsentiert**

Im Oktober 2001 wurde das QM-System der PTB erfolgreich vor dem QS-Forum von EUROMET vorgestellt. Diese Präsentation dient der Anerkennung der im Multilateralen Abkommen des „Internationalen Komitees für Maß und Gewicht“ (CIPM-MRA) vereinbarten deutschen Mess- und Kalibriermöglichkeiten.

#### **Leitfaden zum Aufbau eines Qualitätsmanagement-Systems in den Laboratorien des Messwesens**

Es wurde ein Leitfaden veröffentlicht, der die Anforderungen der DIN EN ISO/IEC 17 025 für ein Kalibrier- bzw. Prüflaboratorium anhand eines Beispiels einer Qualitätsmanagement-Dokumentation veranschaulicht und interpretiert.

#### **Konzept für interne Schulungen im Qualitätsmanagement**

Es wurde ein Konzept entwickelt und eingeführt, dass in angemessenem Umfang Maßnahmen zur Einweisung aller Mitarbeiter der PTB in das in der PTB eingeführte Qualitätsmanagement-System vorsieht.

#### **Einführung des QM-Systems in Abteilung Q erfolgreich abgeschlossen**

Das 1999 eingerichtete Projekt zur Einführung des QM-Systems in *Abteilung Q* wurde im Herbst 2001 mit einer QM-Bewertung erfolgreich abgeschlossen.

### **Informationstechnologie**

#### **Netzwerk der PTB**

Nach der im Jahr 2000 durchgeführten Umstellung des Lokalen Datennetzes von Fast auf Gigabit-Ethernet wurden jetzt die Planungen für eine Ausweitung von Gigabit-Ethernet im sonstigen Backbone-Bereich unter Verwendung neuer Switch-Komponenten durchgeführt.

#### **Firewall-Systeme**

Für die Standorte der PTB in Braunschweig und Berlin wurden die schon Ende 2000 begonnenen Planungen für neue Firewall-Systeme weitergeführt und durch Beschaffung und Installation abgeschlossen.

#### **Netware-Cluster-Services**

Die vorhandenen Netware-Server in der PTB wurden durch Netware-Cluster in Braunschweig und Berlin erweitert, um die Verfügbarkeit der angebotenen Netware-Dienste zu erhöhen.

#### **Lotus Notes/Domino**

Um den Bedarf an einer modernen Kommunikations-Software zu decken, wurde in der PTB entschieden, das Produkt Lotus Notes/Domino einzuführen, das neben den Funktionen eines E-Mail-Programms Kalender-, Dokumenten-Management- und Work-Flow-Funktionen bietet.

#### **SAP-Server**

Für den Betrieb der SAP-Infrastruktur wurden drei UNIX-basierende Serversysteme aufgebaut und mit einer Hochverfügbarkeitssoftware ausgestattet.

#### **Storage-Management**

Das Storage-Management-System wurde zur Erhöhung der Online-Speicherkapazität und zur Beschleunigung des Zugriffs auf Datensicherungen durch eine neue modular erweiterbare Tape-Library ausgebaut.

#### **Weiterer Ausbau der Datenbank-Infrastruktur in der PTB**

Den mit dem Ausbau der Datenbank-Infrastruktur – insbesondere durch die Einführung von SAP/R3 – erheblich gewachsenen Anforderungen an die Administration der Oracle-Datenbanken wurde durch die Entwicklung von Werkzeugen zur automatischen Überwachung der Datenbank-Instanzen begegnet.

# PTB

## Die Anlagen

# Kuratorium

## Mitglieder

Präsident des Kuratoriums

**Ministerialdirektor Dr. jur. Eike Röhling**  
Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, Berlin

Stellvertretender Präsident des Kuratoriums  
**Prof. Drs. h. c. Dr. rer. nat. Heinz-Georg Wagner**  
Institut für Physikalische Chemie  
Universität Göttingen

**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 Auwetter-Kurtz**  
Institut für Raumfahrtssysteme  
Universität Stuttgart

**Prof. Drs. h. c. 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. h. c. Dr. rer. nat. Klaus von Klitzing**  
Direktor am Max-Planck-Institut für Festkörper-  
forschung, Stuttgart

**Dr.-Ing. Horst Lennertz**  
Mitglied der Geschäftsführung  
E-Plus Mobilfunk GmbH, Düsseldorf

**Prof. Dr. rer. nat. Jürgen Mlynek**  
Präsident der Humboldt-Universität, Berlin

**Prof. Dr.-Ing. Volker Pilz**  
Bayer AG, Leverkusen

**Professor Dr. rer. nat. Frank Pobell**  
Wissenschaftlicher Direktor  
Forschungszentrum Rossendorf

**Dr.-Ing. habil. Joachim Scheuren**  
Geschäftsführer der Müller-BBM, Planegg

**Dipl.-Phys. Hans Schillo**  
Direktor, Ruhrgas AG, Essen

**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 Aufsichtsrates  
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 Werk-  
zeugmaschinen, 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

<b>Präsidium</b>	<b>Präsident u. Prof.</b> Dir. Dr. E. O. Göbel ☎ 10 00	<b>Vizepräsident u. Prof.</b> Prof. Dr. M. Kochsiek ☎ 20 00	<b>Mitglied des Präsidiums</b> Dir. u. Prof. Dr. H. Kunzmann ☎ 30 00	<b>Präsidiale Stabsstelle</b> Dir. u. Prof. Prof. Dr. M. Kühne ☎ 10 09
------------------	--	---	---	---

<b>Presse- und Öffentlichkeitsarbeit</b> Dir. Dr. J. Simon ☎ 30 05	<b>Vertreter des Präsidenten in Berlin:</b> Dir. u. Prof. Prof. Dr. B. Wende ☎ [Ch] 335
--	---

<b>Abteilung Z</b> <b>Verwaltung und Betrieb</b> Abt. Dir. C. Tampier ☎ 90 10 <b>Ständiger Vertreter</b> Reg. Dir. Dr. R. Weiß ☎ 92 00
--

<b>Abteilung 1</b> <b>Mechanik und Akustik</b> Dir. u. Prof. Prof. Dr. M. Peters ☎ 10 10
---

<b>Abteilung 2</b> <b>Elektrizität</b> Dir. u. Prof. Dr. H. Bachmair ☎ 20 10
---

<b>Abteilung 3</b> <b>Thermodynamik und Explosionsschutz</b> Dir. u. Prof. Dr. W. Hemminger ☎ 30 10
--

<b>Abteilung 4</b> <b>Optik</b> Dir. u. Prof. Dr. F. Riehle ☎ 40 10
--

<b>Abteilung 5</b> <b>Fertigungsmesstechnik</b> Prof. Dr. K. Hasche ☎ 50 10
--

<b>Abteilung 6</b> <b>Ionisierende Strahlung</b> Dir. u. Prof. Dr. J. Böhm ☎ 60 10
---

<b>Referat Z.11</b> <b>Haushalt</b> ORR H. Paetz ☎ 91 10
<b>Referat Z.12</b> <b>Personal</b> Reg. Dir. in S. Wiemann ☎ 91 20
<b>Referat Z.13</b> <b>Beschaffung, Justitiariat</b> ORR M. Gahrens ☎ 91 30
<b>Referat Z.14</b> <b>Organisation</b> Dr. J. Jaspers ☎ 91 40
<b>Referat Z.15</b> <b>Verwaltung Berlin</b> Reg. Dir. A. Lubinus ☎ [Ch] 448
<b>Referat Z.16</b> <b>Innere Dienst</b> ROAR M. List ☎ 91 60
<b>Referat Z.17</b> <b>Technischer Dienst</b> TROAR M. Fröhaut ☎ 91 70

<b>Fachbereich 1.1</b> <b>Festkörpermechanik</b> Reg. Dir. Dr. R. Schwartz ☎ 11 00
Fachlab. 1.11 <b>Masse</b> Reg. Dir. Dr. M. Gläser ☎ 11 10
Fachlab. 1.12 <b>Kraft</b> Reg. Dir. Dr. A. Sawla ☎ 11 20
Fachlab. 1.13 <b>Drehmoment</b> Reg. Dir. Dr. D. Peschel ☎ 11 30
Fachlab. 1.14 <b>Waagen</b> ORR Dr. P. Zervos ☎ 11 40

<b>Fachbereich 1.3</b> <b>Fluidmechanik</b> Dir. u. Prof. Prof. Dr. Dr. D. Dopheide ☎ 13 00
Fachlab. 1.31 <b>Strömungsmesstechnik</b> Reg. Dir. Dr. H. Müller ☎ 13 10
Fachlab. 1.32 <b>Flüssigkeitsmessgeräte</b> Dr. G. Wendt ☎ 13 20
Fachlab. 1.33 <b>Gasmessgeräte</b> ORR Dr. R. Kramer ☎ 13 30

<b>Fachbereich 2.1</b> <b>Gleichstrom und Niederfrequenz</b> Dir. u. Prof. Dr. E. Braun ☎ 21 00
Fachlab. 2.11 <b>Wechselstromgrößen</b> ORR Dr. H. Melcher ☎ 21 16
Fachlab. 2.12 <b>Gleichstromgrößen</b> Reg. Dir. Dr. P. Warnecke ☎ 21 20

<b>Fachbereich 2.3</b> <b>Elektrische Energietechnik</b> Dir. u. Prof. Dr. A. Braun ☎ 23 00
Fachlab. 2.31 <b>Messwandler und Hochspannungstechnik</b> Reg. Dir. Dr. K. Schon ☎ 23 10
Fachlab. 2.32 <b>Wechsel-Gleich-Transfer</b> Reg. Dir. Dr. M. Klötz ☎ 23 20
Fachlab. 2.33 <b>Elektrizitätszähler</b> Reg. Dir. Dr. R. Bergeest ☎ 23 30

<b>Fachbereich 2.2</b> <b>Hochfrequenz und Magnetismus</b> *Dir. u. Prof. Dr. H. Bachmair ☎ 20 10
Fachlab. 2.21 <b>Elektromagnetische Felder</b> Reg. Dir. Prof. Dr. J. Glimm ☎ 22 10
Fachlab. 2.22 <b>Hochfrequenzmesstechnik</b> Reg. Dir. Dr. U. Stumper ☎ 22 20
Fachlab. 2.23 <b>Magnetische Größen</b> Reg. Dir. Dr. K. Weyand ☎ 22 40
Fachlab. 2.24 <b>Speichertechnik</b> Reg. Dir. Dr. M. Albrecht ☎ 22 50

<b>Fachbereich 2.4</b> <b>Quantenelektronik</b> Dir. u. Prof. Dr. J. Niemeyer ☎ 24 00
Fachlab. 2.41 <b>Halbleiterstrukturen</b> ORR Dr. F.-J. Ahlers ☎ 24 10
Fachlab. 2.42 <b>Metallische Strukturen</b> Dr. A. Zorn ☎ 24 02

<b>Fachbereich 3.1</b> <b>Thermodynamische Größen</b> Dir. u. Prof. Dr. H. Bauer ☎ 31 00
Fachlab. 3.11 <b>Dichte</b> ORR Dr. H. Bettin ☎ 31 10
Fachlab. 3.12 <b>Viskosität</b> ORR Dr. G. Klingenberg ☎ 31 20
Fachlab. 3.13 <b>Druck</b> Reg. Dir. Dr. J. Jäger ☎ 31 30
Fachlab. 3.14 <b>Kalorische Größen</b> Reg. Dir. Dr. S. Sarge ☎ 31 40

<b>Fachbereich 3.2</b> <b>Chemische Physik</b> Dir. u. Prof. Dr. W. Richter ☎ 32 00
Fachlab. 3.21 <b>Metrologie in der Chemie</b> ORR Dr. A. Henrion ☎ 32 10
Fachlab. 3.22 <b>Chemisch-analytische Dienste</b> Reg. Dir. Dr. D. Schiel ☎ 32 20
Fachlab. 3.23 <b>Analytische Messtechnik und Feuchte</b> Dr. G. Scholtz ☎ 32 30

<b>Fachbereich 3.3</b> <b>Physikalische Sicherheitstechnik</b> Dir. u. Prof. Dr. H. Bothe ☎ 33 00
Fachlab. 3.31 <b>Kenngrößen des Explosionsschutzes</b> ORR in Dr. E. Brandes ☎ 33 10
Fachlab. 3.32 <b>Explosionsdynamik</b> Reg. Dir. Dr. H. Förster ☎ 33 20
Fachlab. 3.33 <b>Physikalische Zündvorgänge</b> ORR Dr. M. Beyer ☎ 33 30

<b>Fachbereich 3.4</b> <b>Explosionsschutz elektrischer Betriebsmittel</b> *Dir. u. Prof. Dr. H. Wehinger ☎ 34 00
Fachlab. 3.41 <b>Druckfeste Kapselung</b> Reg. Dir. Dr. U. Klausmeyer ☎ 34 10
Fachlab. 3.42 <b>System- und Eigensicherheit</b> Reg. Dir. Dr. U. Johannsmeyer ☎ 34 20
Fachlab. 3.43 <b>Explosionsschutzgeschützte Maschinen</b> Reg. Dir. Dr. U. Engel ☎ 34 30

<b>Fachbereich 4.1</b> <b>Licht und Strahlung</b> Dir. u. Prof. Prof. Dr. J. Metzdorf ☎ 41 00
Fachlab. 4.11 <b>Radiometrische Einheiten</b> ORR Dr. Dr. K. Stock ☎ 41 10
Fachlab. 4.13 <b>Angewandte Radiometrie</b> Reg. Dir. Dr. W. Möller Reg. Dir. Dr. K. Möstl ☎ 41 30

<b>Fachbereich 4.2</b> <b>Bild- und Wellenoptik</b> Dir. u. Prof. Dr. D. Hoeschen ☎ 42 00
Fachlab. 4.21 <b>Bildoptik u. Spektrometrie</b> Reg. Dir. Dr. E. Sutter Reg. Dir. Dr. I. Weingärtner ☎ 42 30 ☎ 42 10
Fachlab. 4.22 <b>Bildanalyse</b> Reg. Dir. W. Mirandé ☎ 42 20

<b>Fachbereich 4.3</b> <b>Länge und Zeit</b> Dir. u. Prof. Dr. J. Helmcke Dir. u. Prof. Dr. C. O. Weiss ☎ 43 00 ☎ 44 00
Fachlab. 4.31 <b>Längeneinheit</b> *Dir. u. Prof. Dr. J. Helmcke ☎ 43 00
Fachlab. 4.32 <b>Zeiteinheit</b> Reg. Dir. Dr. A. Bauch ☎ 43 20
Fachlab. 4.33 <b>Zeit- und Frequenzübertragung</b> Reg. Dir. Dr. P. Hetzel ☎ 43 30

<b>Fachbereich 5.1</b> <b>Nano- und Mikrometrologie</b> Dir. u. Prof. Dr. G. Wilkening ☎ 51 00
Fachlab. 5.12 <b>Mikro- und Nanotopographie</b> Reg. Dir. Dr. L. Koenders Dr. K. Hermann ☎ 51 20 ☎ 51 40
Fachlab. 5.13 <b>Interferentielle Längenmessung</b> Reg. Dir. Dr. G. Bönsch ☎ 51 30

<b>Fachbereich 5.2</b> <b>Längen- u. Winkelmesstechnik</b> Reg. Dir. Dr. H. Bosse ☎ 52 00
Fachlab. 5.21 <b>Längenmessmittel</b> Reg. Dir. Dr. A. Abou-Zeid ☎ 52 10
Fachlab. 5.22 <b>Längenteilung und Maskenmesssysteme</b> *Reg. Dir. Dr. H. Bosse ☎ 51 10

<b>Fachbereich 5.3</b> <b>Koordinatenmesstechnik und Messgerätebau</b> Dir. u. Prof. Dr. F. Wäldele ☎ 53 00
Fachlab. 5.31 <b>Maß und Form</b> ORR Dr. O. Jusko ☎ 53 10
Fachlab. 5.32 <b>Koordinatenmessgeräte</b> RR z. A. Dr. H. Schwenke ☎ 53 20
Fachlab. 5.33 <b>Wissenschaftlicher Gerätebau</b> ORR Dr. F. Löffler ☎ 53 40

<b>Fachbereich 6.1</b> <b>Radioaktivität</b> Dir. u. Prof. Dr. H. Janßen ☎ 61 00
Fachlab. 6.11 <b>Aktivitätseinheit und Messverfahren</b> *Dir. u. Prof. Dr. H. Janßen ☎ 61 00
Fachlab. 6.12 <b>Umweltradioaktivität</b> ORR Dr. D. Arnold ☎ 61 20
Fachlab. 6.13 <b>Betrieblicher Strahlenschutz</b> Reg. Dir. Dr. W. Vorbrugg ☎ 61 30

<b>Fachbereich 6.2</b> <b>Dosimetrie für Strahlentherapie und Diagnostik</b> Reg. Dir. Dr. H.-M. Kramer ☎ 62 00
--

<b>Fachbereich 6.3</b> <b>Strahlenschutzdosimetrie</b> Dir. u. Prof. Dr. W. G. Alberts ☎ 63 00
Fachlab. 6.31 <b>Orts- und Personendosimetrie</b> Reg. Dir. Dr. P. Ambrosi ☎ 63 10
Fachlab. 6.32 <b>Dosimetrie in der Umwelt</b> ORR Dr. S. Neumaier ☎ 63 20

<b>Fachbereich 6.4</b> <b>Neutronenstrahlung</b> Dir. u. Prof. Dr. H. Klein ☎ 64 00
Fachlab. 6.41 <b>Neutronenmetrologie</b> Reg. Dir. Dr. S. Guldbakke Reg. Dir. Dr. H. J. Brede ☎ 64 10 ☎ 64 30
Fachlab. 6.42 <b>Neutronendosimetrie</b> Reg. Dir. Dr. H. Schuhmacher ☎ 64 40

## Deutscher Kalibrierdienst



<b>Akkreditierungsstelle des Deutschen Kalibrierdienstes</b> ORR Dr. W. Bosch ☎ 83 22
---

Fachaufsicht  
BMW, Referat VI A2  
  
Dienstaufsicht  
Präsidium der PTB

# Benannte Stellen nach europäischen Richtlinien

(Nummer: 0102)

## Zertifizierungsstelle für nichtselbsttätige Waagen

EG-Richtlinie: 90/384/EWG  
Leiter  
ORR Dr. P. Zervos  
im Fachlaboratorium 1.14  
☎ 11 40

## Zertifizierungsstelle für medizinische Messgeräte

EG-Richtlinie: 93/42/EWG  
Leiter  
Dir. u. Prof. Dr. H. Koch  
im Fachbereich 8.2  
☎ [Ch] 343

## Zertifizierungsstelle für Explosionsschutz

EG-Richtlinie: 94/9/EG  
Leiter  
Dir. u. Prof. Dr. H. Wehinger  
im Fachbereich 3.4  
☎ 34 00

## Zuständige Stelle für elektromagnetische Verträglichkeit

EG-Richtlinie: 89/336/EWG  
Leiter  
Reg. Dir. Prof. Dr. J. Glimm  
im Fachlaboratorium 2.21  
☎ 22 10

## Zertifizierungsstelle für Augenschutzgeräte

EG-Richtlinie: 89/686/EWG  
Leiter  
Dir. u. Prof. Dr. D. Hoeschel  
im Fachbereich 4.2  
☎ 42 00

## Organisatorisches

### Mitarbeitervertretungen

<b>Gesamtpersonalrat</b> U. Meyer	☎ (05 31) 592-10 98
<b>Örtlicher Personalrat Braunschweig</b> U. Meyer	☎ (05 31) 592-10 90
<b>Örtlicher Personalrat Berlin</b> H.-J. Handke	☎ (030) 34 81-337
<b>Gesamtvertretung der Schwerbehinderten</b> T. Quandt	☎ (05 31) 592-10 97
<b>Vertretung der Schwerbehinderten Braunschweig</b> T. Quandt	☎ (05 31) 592-10 97
<b>Vertretung der Schwerbehinderten Berlin</b> H.-J. Ertel	☎ (030) 34 81-355
<b>Frauenbeauftragte</b> B. Hoffmann	☎ (05 31) 592-91 33

### Anschriften der PTB

<b>Hausadressen</b>		
<b>Braunschweig:</b> Bundesallee 100 38116 Braunschweig ☎ (05 31) 592-0 Durchwahl 592... Telefax: (05 31) 592-92 92	<b>Berlin-Charlottenburg:</b> Abbestraße 2-12 10587 Berlin ☎ (030) 34 81-1 Durchwahl 34 81... [Ch] Telefax: (030) 34 81-490	<b>Berlin-Friedrichshagen:</b> Fürstenwalder Damm 388 12587 Berlin ☎ (030) 64 41-0 Durchwahl 64 41... [Fh] Telefax: (030) 64 41-348
<b>Postfach-Adresse</b> Postfach 33 45 38023 Braunschweig	<b>Internet</b> http://www.ptb.de/ E-mail: presse@ptb.de	

### Impressum

Herausgegeben von der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt  
Braunschweig und Berlin  
Braunschweig, Januar 2002  
Satz, Gestaltung, Übersetzung: PTB, Presse- und Öffentlichkeitsarbeit  
Druck: Sigert GmbH, Braunschweig  
Nachdruck mit Quellenangabe gestattet.

# Jahresbericht im Internet

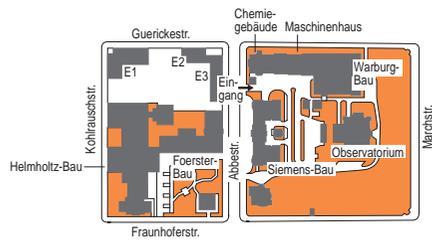
Der gedruckte Teil des Jahresberichts liefert Ihnen in überschaubarer Form einen Überblick über die PTB im Jahre 2001. Den kompletten Jahresbericht mit Nachrichten und speziellen Listen finden Sie auf den Internetseiten der PTB (unter [www.ptb.de](http://www.ptb.de) im Bereich „Publikationen“).

Außerdem führen wir Sie von dort zur Datenbank Publica, in der bibliographische Angaben zu sämtlichen Veröffentlichungen und Vorträgen von PTB-Mitarbeitern gesammelt werden, und liefern Ihnen zu jeder Fachabteilung der PTB zusätzlich einen Auszug aus dieser Datenbank (Veröffentlichungen des Jahres 2001).

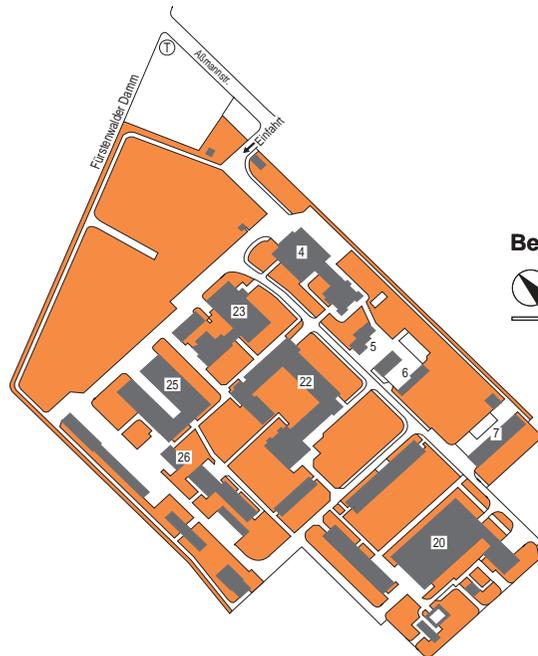
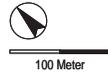
### Inhalt:

- **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

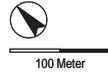
# Geländeplan Berlin



## Berlin-Charlottenburg



## Berlin-Friedrichshagen



### Laborgebäude

Haus 4  
Haus 20  
Haus 23

### Gerätebau

Haus 25  
Haus 26

### Technische Dienste

Haus 5  
Haus 6  
Haus 7  
Haus 22

### Verwaltung

Haus 22