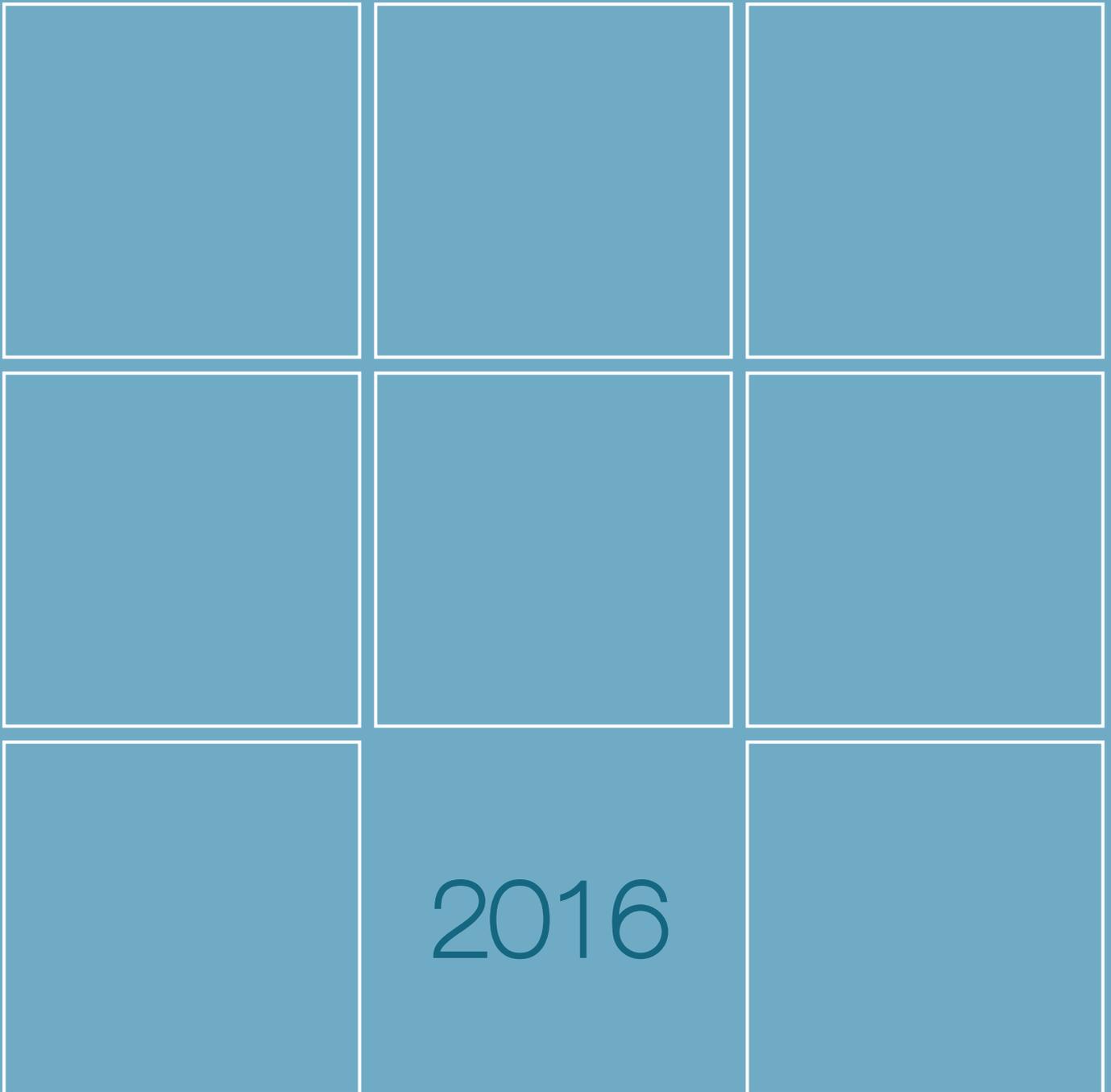




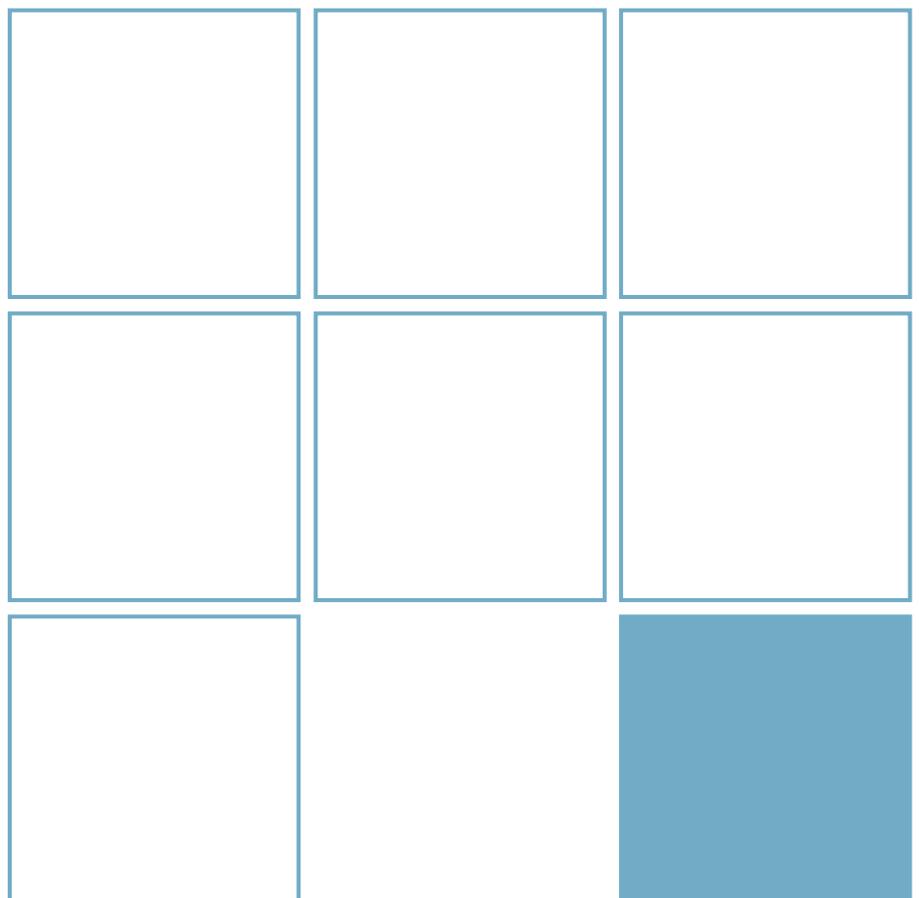
# PTB jahresbericht

Annual Report

---



Physikalisch-Technische  
Bundesanstalt  
Jahresbericht 2016



# Vorwort

„Die Bereitstellung der nationalen Messinfrastruktur in Deutschland auf international höchstem Niveau für Industrie, Gesellschaft und Wissenschaft“. Das ist der zentrale Anspruch der PTB seit nunmehr 130 Jahren, welcher beim Besuch des Wissenschaftsrates (WR) vom 12. bis 14. Oktober 2016 im Auftrag des BMWi einer intensiven Prüfung unterzogen wurde. Die Kommission zeigte sich beeindruckt von der hohen Motivation der PTBisten, der hervorragenden Vorbereitung des Besuches sowie der sich u.a. in den Kennzahlen ausdrückenden Leistungsfähigkeit der PTB. In allen relevanten Bereichen konnte sich die PTB seit dem ersten Besuch der Kommission im Jahre 2007 erheblich weiter verbessern.

Im Abschlussgespräch hob die Kommission das große, meist drittmittelbasierte Engagement der PTB bei der Bewältigung zukünftiger metrologischer Herausforderungen hervor und bestätigte die bereits sehr gute Positionierung in den Bereichen Metrologie für die Energiewende, für die Biochemie und -medizin, sowie für quantenverstärkte Metrologie. In all diesen Gebieten, hauptsächlich jedoch bei der Metrologie für die Digitalisierung, sah die Kommission die dringende Notwendigkeit, die Rolle der PTB massiv zu stärken, nicht zuletzt durch die Zuweisung von Dauerstellen.

Die digitale Kompetenz nach außen kann nur funktionieren, wenn die „interne Digitalisierung“ der PTB mit der „äußeren“ abgestimmt und hoch entwickelt ist. Aufgrund der Besonderheiten der PTB, nämlich der komplexen Geschäftsprozesse mit intimer Verwebung von Verwaltung und Dienstleistung, sowie der besonderen Anforderungen als forschungsstarke Einrichtung ist die an sich zu begrüßende Entscheidung der Bundesregierung, Standard-IT-Dienste im Rahmen des e-Gouvernement Gesetz zu zentralisieren, grundsätzlich nicht auf die PTB anwendbar. Hierzu hat die PTB ein Papier erarbeitet und befindet sich in Gesprächen mit dem Ziel, zu überzeugen, dass eine allgemeine Konsolidierung der IT-Prozesse an der PTB ihre Arbeitsfähigkeit massiv gefährden würde.

Ein wesentliches Ergebnis der Strategieklausur zu Beginn des Jahres war es, interne Mechanismen weiter zu entwickeln, um neue Themen möglichst effizient aus eigener Kraft aufzugreifen und die zu-

gehörigen Veränderungen zusammen mit den Mitarbeiter/innen zu gestalten.

Zentrales Thema bei der Kuratoriumstagung 2016 war der Masterplan zur langfristigen Ertüchtigung der Liegenschaften der PTB, hauptsächlich in Braunschweig. Der sehr detaillierte, gut durchdachte und mit allen Fachabteilungen abgestimmte Plan fand uneingeschränkt die Unterstützung zunächst des Kuratoriums und in der Folge auch des BMWi, des BMUB und der WR Kommission. Der bis mindestens 2030 angelegte Plan im Gesamtumfang von ca. 330 Mio. € wurde vollumfänglich in die unmittelbare Haushaltsplanung aufgenommen. Derzeit arbeiten die mit der technischen Infrastruktur befassten Stellen der PTB mit ihren Partnern im Staatlichen Baumanagement und dem Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) intensiv an der Umsetzung der ersten Projekte wie z. B. des Kompetenzzentrums „Windenergie“.

Die wichtigste Ressource der PTB, ihr hochkompetentes und -motiviertes Personal, stand auch in diesem Jahr wieder im Fokus zahlreicher Fortbildungen und Angebote für Mitarbeiter/innen mit und ohne Führungsfunktionen. So wurden unsere „Leitlinien Führung und Zusammenarbeit“ überarbeitet mit dem erklärten Ziel, eigenverantwortliches Arbeiten weiter zu stärken, sowie die Prinzipien von Vertrauen und wechselseitiger Wertschätzung und Achtsamkeit zu verfestigen. Zusätzlich zu zielgruppenspezifischen Seminaren haben sich im Jahr 2016 neue kollegiale Beratungsgruppen gebildet, die Quervernetzung und Austausch fördern. Weitere Meilensteine waren der diesjährige Führungskräftetag mit 150 Teilnehmenden, das zweite „PTB-Forum – Gespräch mit dem Präsidium“, das dem direkten Austausch zwischen Präsidium und Mitarbeitenden dient, sowie die Umfrage zu psychischen Belastungen am Arbeitsplatz. Die Weiterentwicklung der Führungskultur und Zusammenarbeit befindet sich somit auf einem guten Weg. Um eine zentrale Anlauf- und Beratungsstelle für alle Fragen rund um die Vereinbarung von Beruf und Familie zu schaffen, wurde das FamilienServiceBüro etabliert. Zudem ist die PTB Partnerin im nationalen Pakt „Komm, mach MINT“, mit dem Ziel, Frauen in naturwissenschaftlich-technischen Berufen zu unterstützen. Schließlich wurde unter dem Motto „MetroSommer 2016: Erlebe den genauesten Sommer Deines Lebens!“ erstmals ein Sommer-

Forschungspraktikum in den Laboratorien der PTB angeboten. Über mehr als zwei Monate hinweg forschten 14 Studentinnen und Studenten in ausgewählten Projekten der PTB – mit durchgehend positiver Resonanz bei allen Beteiligten, so dass es das Angebot im Jahr 2017 wieder geben wird.

Das neu geordnete Mess- und Eichgesetz wurde im vergangenen Jahr in einigen Punkten nochmal präzisiert. Seit dem Inkrafttreten des neu geordneten Gesetzes vor zwei Jahren haben die Akteure Erfahrungen sammeln können und sich gut auf die neuen Anforderungen eingestellt. Die Konformitätsbewertung und die Anforderungen an Messgeräte gemäß der Anlage 2 der Mess- und Eichverordnung stellen ein hohes Schutzniveau dar, gerade auch für Messgeräte, die im amtlichen Verkehr verwendet werden. Ein Beispiel sind Geschwindigkeitsmessgeräte, für welche die PTB aufgrund ihrer langjährigen und einzigartigen Fachkompetenz immer wieder um Stellungnahmen gebeten wird. In Zukunft wird die PTB möglicherweise auch eine deutlich stärkere Rolle bei der Überwachung von Emissionswerten von Fahrzeugen spielen, um mitzuhelfen, das verlorene Vertrauen der Kunden zurückzugewinnen. Der bei der PTB eingerichtete Regelermittlungsausschuss hat sich bewährt und leistet wichtige Beiträge für das neue Mess- und Eichwesen: So hat er für das Zukunftsthema der E-Mobilität die betroffenen Kreise an und mit der PTB zusammengebracht und alle notwendigen Entscheidungen aus Sicht des Mess- und Eichrechts für 2017 vorbereitet.

Ein Highlight des vergangenen Jahres und ein uneingeschränkter Erfolg war zweifellos die Vollversammlung für das Mess- und Eichwesen in ihrer neuen Rolle, bei der neben den neuen gesetzlichen Vorgaben auch die Revision des OIML-Zertifizierungssystems ein wichtiges Thema war: Nachdem die OIML-Generalkonferenz CIML im Jahr 2013 beschlossen hatte, das OIML-Zertifizierungssystem zu erneuern, wurde unter der Federführung des PTB- und OIML-Vizepräsidenten Roman Schwartz hierzu das Rahmendokument OIML B 18 erarbeitet, das auf der CIML-Sitzung im Oktober 2016 verabschiedet wurde. Auch in der Vollversammlung stieß das Thema „Digitalisierung“ auf breitestes Interesse bei allen Beteiligten. In intensiven Diskussionen bestärkten Eichbehörden, interessierte Kreise und Industrie die PTB in ihrem Bestreben, die Rolle einer kompetenten Unterstützerin aller Beteiligten einzunehmen.

Der erfolgreiche Start des Technologie-Transferprogramms „TransMet“ 2015 setzte sich auch in diesem

Jahr mit verschiedenen Projekten fort, wobei sich insbesondere im Bereich optischer Technologien ein Schwerpunkt herauskristallisierte. Zusammen mit Ihrer Tätigkeit in der Regelsetzung und in der Normung leistet die PTB damit einen wichtigen Beitrag zum Technologietransfer. Mit 50 Patentanmeldungen im Zeitraum von 2013 bis 2015 und einer rigorosen Technologiebewertung stellt sich auch die Patentstrategie äußerst effektiv dar, wie von der WR Kommission im Abschlussgespräch hervorgehoben wurde.

Ein Großereignis, das – im positiven Sinn – seine forschungsintensiven Schatten vorauswirft, ist die für 2018 erwartete Revision der Weltsprache von Handel und Wissenschaft: des Internationalen Systems der Einheiten, SI. In einer wegweisenden Sitzung des Konsultativ-Komitees für Einheiten (CCU) wurden unter der Präsidentschaft der PTB die entscheidenden Weichen gestellt. So müssen bis zum 1. Juli 2017 Messwerte für die „definierenden Konstanten“, wie z. B. die Planck-, Avogadro-, oder Boltzmann-Konstante, zur Publikation eingereicht und zur Veröffentlichung angenommen sein, um zur Festlegung ihrer endgültigen Zahlenwerte offiziell beitragen zu können. Hier hat die PTB auf der Basis enger interner Zusammenarbeit und starker internationaler Kooperationen im vergangenen Jahr herausragende Ergebnisse erzielt:

- Mittels Dielektrizitätskonstanten-Gasthermometrie (DCGT) wurde eine unabhängige, hochgenaue Bestimmung der Boltzmann-Konstanten mit einer relativen Unsicherheit von nur 1,9 ppm realisiert. Damit ist der Weg frei für die Neudefinition des Kelvins über die Festlegung der Boltzmann-Konstante.
- Für die Neu-Definition des Kilogramm befindet sich das internationale Avogadro-Projekt ebenfalls auf sehr gutem Weg, im Endspurt die weltweit kleinste Unsicherheit bei der Bestimmung der Avogadro- und Planck-Konstanten zu realisieren durch die metrologische Charakterisierung hochreiner Silizium-Einkristallkugeln. Ein Helmholtz-Symposium sowie ein internationaler Workshop demonstrierten hier das weltweite Interesse an Silizium-Kugeln als dauerhafte und vergleichsweise einfach zu handhabende Realisierungen der Einheit der Masse nach der Revision.
- Im Jahr 2016 konnte gezeigt werden, dass sich bereits mit einer Einzelelektronen-Stromquelle, ohne Fehlerkorrektur, eine Messunsicherheit von  $0,16 \mu\text{A/A}$  erreichen lässt. Das Quanten-Ampère

kann damit genauer realisiert werden als das klassische Ampère im heutigen SI. Dank weiterer technologischer und experimenteller Fortschritte stehen jetzt die wichtigsten Bausteine einer selbstreferenzierten Quantenstromquelle zur Verfügung.

Ein zunehmend wichtiger Partner der PTB auf nationaler Ebene sind neben anderen Forschungseinrichtungen die Universitäten. So wurden mit der Technischen Universität Braunschweig (TUBS) im vergangenen Jahr zwei gemeinsame Berufungen realisiert. Bei den Quantentechnologien setzte sich die enge und langjährige Zusammenarbeit mit der Leibniz Universität Hannover (LUH) unter anderem im Rahmen des neuen, unter Federführung der PTB eingeworbenen Sonderforschungsbereichs „DQ-Mat“ fort. Eine deutschlandweit einmalige, strategisch-strukturelle Dreieckspartnerschaft der PTB mit beiden Universitäten, die zukunftssträchtige Zusammenführung der Quanten- (LUH) und Nano- (TUBS) Metrologie (PTB), wurde exzellent beurteilt. Sie wird nun durch das Land Niedersachsen über 5 Jahre hinweg im Rahmen des sogenannten „Masterplans“ mit erheblichen Mitteln unterstützt. Darauf aufbauend wurde gerade der Vorantrag eines gemeinsamen Exzellenz Clusters „Quantum-Frontiers“ über insgesamt 57 Mio. € fertiggestellt.

Auch das Institut Berlin der PTB hat im vergangenen Jahr die vielfältige Kooperation mit der Technischen Universität Berlin durch eine gemeinsame Doktorandenausbildung im Bereich der quantitativen Bildgebung sowie durch weitere gemeinsame Doktorarbeiten z. B. in der Informatik und im Bereich der Synchrotronstrahlung systematisch ausgebaut. Das von der DFG-geförderte gemeinsame Graduiertenkolleg (BIOQIC) zwischen Charité, TU-Berlin, FU-Berlin und PTB (stellvertretender Sprecher) soll dabei eine interdisziplinäre Ausbildung ermöglichen. Strategisch platziert sich die PTB im Wachstumsbereich der Digitalisierung durch gemeinsame Professuren zu „vertrauenswürdigen Systemarchitekturen“ und „maschinellern Lernen“ im Rahmen des neuen „Einstein Zentrums“. Dieses wurde von einem Arbeitskreis mit Vertretern aus Wissenschaft, Wirtschaft und Politik verabschiedet, vernetzt über 30 neu eingerichtete Professuren und ist Teil der 10-Punkte-Agenda zur Etablierung Berlins als IT-Hauptstadt.

Auf europäischer Ebene richtet sich zur Halbzeit des erfolgreichen europäischen Metrologie-Forschungsprogramms EMPIR der Fokus zunehmend darauf, die erreichten Erfolge langfristig zu sichern. Mögliche Wege führen über eine noch engere Ko-

operation und Koordination der europäischen Partner, sowie über die von der PTB vorgeschlagene Einrichtung eines speziellen, von der Europäischen Union zu unterstützenden Infrastrukturprogrammes zur Verstärkung metrologischer Dienste, die aus entweder aus EMPIR erwachsen oder von paneuropäischem Interesse sind.

Auf globaler Ebene baut die PTB Ihren Beitrag zur internationalen Harmonisierung aus, flankiert durch die entwicklungspolitische Schwerpunktsetzung der Bundesregierung. Im Rahmen einer strategischen Partnerschaft unterstützt die PTB nun auch die Weltbank durch die zeitweise Entsendung einer Mitarbeiterin nach Washington. Auch im vergangenen Jahr hatte ich Gelegenheit, mich bei verschiedenen Auslandsreisen u.a. zur Jahresversammlung des SIM, der regionalen Metrologie-Organisation des amerikanischen Kontinents, der hohen Anerkennung zu vergewissern, welche die PTB weltweit dank der hohen Kompetenz und des großen Einsatzes ihrer Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter in allen Bereichen genießt.

Ich bedanke mich herzlich bei allen Mitarbeiter/innen für das große Engagement, für Ihre Hingabe an die Metrologie und Ihre stets verlässliche Arbeit, die höchsten metrologischen Ansprüchen genügt. Ganz besonders würdigen möchte ich die vielfältige Unterstützung bei der Vorbereitung und Durchführung des Besuches der Evaluierungskommission auf allen Ebenen. Ohne den Beitrag jeder und jedes Einzelnen, von der Infrastruktur über die Verwaltung zu Dienstleistung und Forschung wären die auch dieses Jahr wieder erzielten, herausragenden Ergebnisse nicht möglich gewesen. Dem endgültigen Bericht des Wissenschaftsrates können wir somit mit Zuversicht entgegen schauen!

# Foreword

“Providing a national measurement infrastructure in Germany to industry, society and science that is internationally of the very highest order.” This has been PTB’s central aspiration for 130 years—and one examined closely by the Wissenschaftsrat (German Council of Science and Humanities, WR) when it visited PTB from 12-14 October 2016 on behalf of the BMWi (Federal Ministry for Economic Affairs and Energy). The commission of the Wissenschaftsrat was impressed by the high degree of motivation that PTB’s staff members demonstrated, by the outstanding preparations that took place prior to its visit, and by PTB’s achievements, as reflected in key performance indicators. In all relevant areas, PTB has improved markedly since the commission’s first visit in 2007.

In the closing dialogue, the commission highlighted PTB’s major dedication to mastering future metrological challenges—a dedication that, in most cases, is based on third-party funding. It also confirmed that PTB is already very well-positioned in the fields of metrology for the “Energiewende” (energy transition), metrology for biochemistry and biomedicine, and quantum-reinforced metrology. In all of these fields, but first and foremost in metrology for digitization, the commission noted the urgent need to strengthen PTB’s role enormously, not least by allocating a greater number of permanent positions.

The digital competence of PTB can function well only if its “internal digitization” is highly developed and coordinated with that of the “outside world”. This puts PTB in a special position: its complex business processes entail a close interweaving of administration and service, and it must assume the special tasks required of an institution with a high emphasis on research. For this reason, the decision made by the German federal government to centralize standard IT services within the framework of the eGovernment Act, even though such a decision is welcome per se, does not generally apply to PTB. PTB has published a paper on this issue and is currently engaged in dialogue with the goal of convincingly arguing that a general consolidation of IT processes at PTB would pose a substantial threat to its working capacity.

One important objective formulated in the strategy meeting held at the beginning of the year was to

further develop internal mechanisms that will allow PTB to address new issues as efficiently as possible on its own, and to plan the resultant changes together with staff members.

The central issue at the 2016 meeting of the Kuratorium (Advisory Board) was the master plan for the long-term upgrading of PTB’s buildings and grounds, primarily in Braunschweig. This highly detailed, well thought-out plan, which was coordinated with all of PTB’s departments, was met by unbridled support first from the Kuratorium, then from the BMWi, the BMUB and the WR commission. The plan, which is set to last until at least 2030 and which has a total budget of around 330 million euros, was completely incorporated into the direct budgeting. Currently, the positions at PTB that are concerned with technical infrastructure are pursuing intense collaboration with their partners at Statliches Baumanagement (state construction management) and at the Federal Institute for Research on Building, Urban Affairs and Spatial Development (BBR) in order to implement initial projects such as the Competence Center for Wind Energy (CCW).

This year, PTB’s most important resource—its highly competent and motivated staff—was once again the focus of numerous advanced training sessions and other offers for employees (those both with and without leadership responsibilities). For example, our “Guidelines for Leadership and Cooperation” were revised with the express goal of further strengthening our employees’ ability to work autonomously, and reinforcing the principles of trust and mutual appreciation and awareness. In addition to seminars for specific target groups, new, collegial advisory groups were formed in 2016 to promote networking across departments and the exchange of ideas. Other milestones set this year included “Managers’ Day”, which was attended by 150 participants, the second “PTB Forum: Talk with the Presidential Board”, which served as a direct exchange between the Presidential Board and employees, and a questionnaire on psychological stress in the workplace. This means that the further development of PTB’s leadership culture and cooperation is headed in the right direction. In order to create a central contact and advice point for all questions about coordinating family and career, the Family Service Office (FamilienServiceBüro) was created. Furthermore,

PTB is a partner in the national “Go MINT” pact (“Komm, mach MINT”), the goal of which is to support women in scientific and technical careers. Finally, under the slogan of “MetroSommer (MetroSummer) 2016—experience the most accurate summer of your life!”, a summer research internship in PTB’s laboratories was offered for the first time. For more than two months, 14 university students conducted research in selected PTB projects. Due to the consistently positive feedback received from all participants, the internship will be offered again in 2017.

Over the past year, several elements of the revised Measures and Verification Act were again refined to be more precise. Since the revised act entered into force two years ago, its stakeholders have gathered experience and adapted well to the new requirements. The conformity assessment and the requirements for measuring instruments in accordance with Annex 2 of the Measures and Verification Ordinance represent a high level of protection, particularly for measuring instruments used for official transactions. Speedometers are one example of instruments for which PTB is frequently asked to provide statements, due to its many years of unique technical competence. In the future, PTB may also take on a significantly more prominent role in monitoring vehicle emission levels in order to help customers regain their lost confidence. The Rule Determination Committee set up at PTB has demonstrated its effectiveness, making important contributions to the new system of metrology and verification—such as bringing together parties both within and from outside PTB for whom the future domain of e-mobility is relevant. Furthermore, PTB has taken all steps necessary for decisions concerning the Measures and Verification Act in 2017.

One highlight of the past year, and an unqualified success, was undoubtedly the General Assembly on Metrology and Verification in its new role: here, in addition to the new legal guidelines, the revision of the OIML certification system was an important issue. Following the 2013 resolution of the OIML General Conference (CIGM) to revise the OIML certification system, the framework document OIML B 18 was created for this purpose under the direction of the Vice-President of PTB and of OIML, Roman Schwartz; this framework document was adopted at the October 2016 meeting of CIGM. In the General Assembly as well, the topic of digitization was met with resounding interest from all participants. In in-depth discussions, verification authorities, interested parties and industrial firms all encouraged

PTB in its efforts to adopt the role of a competent facilitator for all parties with a stake in this topic.

The successful launch of the “TransMet” technology transfer program in 2015 continued this past year in different projects, with the field of optical technologies emerging as a focus area. This program, together with PTB’s activity in regulation and standardization, represents an important contribution to technology transfer by PTB. With 50 patent applications filed between 2013 and 2015, and with a rigorous system of technology assessment in place, PTB’s patenting strategy has shown itself to be highly effective; this point was given special emphasis by the WR commission in its closing dialogue.

One major event that will provide—in a positive sense—a taste of things to come in research-intensive fields is the 2018 revision of the International System of Units (SI), the lingua franca of international trade and science. The decisive course for this revision was set in a groundbreaking meeting of the Consultative Committee for Units (CCU) under the leadership of PTB. As an example, by 1 July 2017, measurement values for the “defining constants”, such as Planck’s constant, the Avogadro constant and the Boltzmann constant, will have to be submitted and accepted for publication in order to officially contribute to the establishment of these constants’ final numerical values. In this area, PTB achieved the following outstanding results over the past year on the basis of close internal collaboration and strong international cooperation projects:

- An independent, highly precise determination of the Boltzmann constant was realized by means of dielectric-constant gas thermometry (DCGT) with a relative uncertainty of only 1.9 ppm. This paves the way for the redefinition of the kelvin by establishing the Boltzmann constant.
- For the redefinition of the kilogram, the international Avogadro project is also well on the way to crossing the finish line in realizing the smallest uncertainty anywhere in the world in order to specify the Avogadro constant and Planck’s constant. This specification takes place by means of metrological characterization of single-crystal spheres made of high-purity silicon. Here, a Helmholtz Symposium and an international workshop demonstrated the international interest in using silicon spheres as long-lasting and relatively easy-to-handle realizations of the unit of mass, following the revision.

- In 2016, it was successfully demonstrated that a measurement uncertainty of  $0.16 \mu\text{A}/\text{A}$  can be obtained even with only one single-electron current source and without error correction. This allows the quantum ampere to be realized with greater precision than the conventional ampere in the current SI. Thanks to additional technological and experimental advances, the most important building blocks for a self-referenced quantum current source are now available.

At a national level, universities are growing in importance as partners of PTB alongside other research institutions. For example, in the past year, two joint professorial appointments with the Technische Universität Braunschweig (TUBS) took place. In the field of quantum technology, the many years of close collaboration with Leibniz Universität Hannover (LUH) continued, such as within the scope of the new “DQ-Mat” special research area, fundraising for which was led by PTB. A strategic and structural tripartite partnership—unique in Germany—between the two universities and PTB, uniting quantum metrology (LUH), nanometrology (TUBS) and the national metrology institute (PTB), has received excellent assessments. The partnership will now enjoy the extensive financial support of the state of Lower Saxony (Land Niedersachsen) for a period of five years within the scope of its so-called “master plan”. Building on this, the preliminary application for a joint excellence cluster called “QuantumFrontiers” (with a total budget of 57 million euros) has just been completed.

Over the past year, PTB’s Berlin institute systematically expanded its own multifaceted collaboration with the Technische Universität Berlin via a joint training program for doctoral students in the field of quantitative imaging, and via additional joint doctoral dissertations in fields such as information technology and synchrotron radiation. Here, the BIOQIC research training group, which is financed by the DFG and jointly pursued by Charité, TU Berlin, FU Berlin and PTB (its Deputy Chair), is set to facilitate an interdisciplinary training program. PTB is strategically positioning itself in the high-growth sector of digitization by jointly appointing professorships on “trustworthy system architectures” and “machine-based learning” within the scope of the new Einstein Center. The Center was approved by a task-force group with representatives from science, economics and politics; it forms a network of 30 new professorships and is part of the 10-point agenda for establishing Berlin as Germany’s IT capital.

On a European level, now that the successful European metrology research program EMPIR has reached its halfway point, the focus is being increasingly trained on ensuring that the successes already achieved are sustained over the long term. Options include an even closer collaboration and coordination between the European partners, and (as PTB has already proposed) setting up a special infrastructure program to be supported by the European Union that will ensure the continued availability of metrological services that either have emerged as part of EMPIR or are of pan-European interest.

On a global level, PTB is expanding its contribution to international harmonization, supported by the German government’s focus on development policy. Within the scope of a strategic partnership, PTB now also supports the World Bank by sending one of its staff members to Washington on an intermittent basis. During my travels abroad over the past year, among them my attendance at the General Assembly of SIM (the Regional Metrology Organization for the Americas), I once again had the opportunity to experience for myself the high regard in which PTB is held throughout the world, thanks to the high degree of competence and the great dedication of its employees in all of their fields.

I would like to extend my heartfelt thanks to all staff members of PTB: Thank you for your great commitment, for your dedication to metrology and for the unwavering dependability of your work, which fulfills the very highest of metrological aspirations. I would also like to express my special appreciation for the diverse sources of support on all levels during the preparation for and implementation of the evaluation commission’s visit. Without the contributions of each and every one of you, from infrastructure and administration to service and research, the results we achieved this year, which were once again outstanding, would not have been possible. We can thus look ahead to the Wissenschaftsrat’s final report with confidence!



Dieser gedruckte Teil des Jahresberichts liefert Ihnen in überschaubarer Form einen Überblick über die PTB im Jahre 2016. 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 „Presse & Aktuelles“).

# Inhaltsverzeichnis

Vorwort • Foreword	
Nachrichten des Jahres • News of the Year	10
Fachabteilungen • Scientific Divisions	10
Kuratorium • Advisory Board	26
Präsidium • Presidential Board	28
Qualitätsmanagement • Quality Management	33
Gesetzliches Messwesen • Legal Metrology	35
Technologietransfer • Technology Transfer	36
Technische Zusammenarbeit • Technical Cooperation	38
Presse- und Öffentlichkeitsarbeit • Press and Information Office	40
Akademische Abschlüsse • Academic Degrees	43
Promotionen • Doctorates	43
Habilitationen • Habilitations	44
Diplom- und Masterarbeiten • (Master) Theses	45
Bachelorarbeiten • Bachelor Theses	46
Zahlen und Fakten • Figures and Facts	48
Berichte der Abteilungen	
Mechanik und Akustik	57
Elektrizität	75
Chemische Physik und Explosionsschutz	89
Optik	103
Fertigungsmesstechnik	117
Ionisierende Strahlung	129
Temperatur und Synchrotronstrahlung	141
Medizinphysik und metrologische Informationstechnik	159
Anhang	
Kuratorium	181
Organigramm	182
Arbeitsgebiete	184
Geländepläne	186

# Nachrichten des Jahres • News of the Year

## Kompetenzzentrum Windenergie

Auf dem Gelände der PTB wird das sogenannte Kompetenzzentrum für Windenergie errichtet. Fachliche Schwerpunkte sind ein Großkoordinatenmessgerät mit Messvolumen von  $5\text{ m} \times 4\text{ m} \times 2\text{ m}$ , eine Drehmomentnormalmesseinrichtung (Dm-NME) zur Rückführung von Drehmomenten bis  $5\text{ MN} \cdot \text{m}$  (ausbaufähig bis  $20\text{ MN} \cdot \text{m}$ ) und ein System zur Kalibrierung von Wind-Lidar-Systemen. Dieses weltweit einzigartige Zentrum dient der Erforschung und Realisierung neuer Messsysteme für Windenergieanlagen. Gleichzeitig wird sich das Dienstleistungsangebot der PTB deutlich erweitern.

### • Koordinatenmesstechnik

Ziel ist die erstmalige und nachhaltige Sicherstellung zuverlässiger und hochgenauer dimensioneller Messungen von Großbauteilen, insbesondere großer Getriebebauteile für Windenergieanlagen. Das geplante Großkoordinatenmessgerät verfügt dabei über drei kartesisch verfahrbare Achsen und einen Drehtisch. Es eignet sich in besonderer Weise für die Messung rotationssymmetrischer Bauteile wie Zahnräder, Rotor-Stator-Bauteile oder Lagerringe. Durch den Einsatz nachführbarer Laserinterferometer ist es darüber hinaus möglich, die Messgenauigkeit der Anlage gegenüber kommerziellen Geräten deutlich zu verbessern. Hierdurch lassen sich Geometriefehler eines Messgerätes und Verformungen durch Temperatureinflüsse besser kompensieren. So liegt z. B. die erwartete Messunsicherheit für Bauteile von  $4\text{ m}$  Durchmesser künftig deutlich unter  $10\text{ }\mu\text{m}$ .

### • Drehmomentmesstechnik

Der Bau der neuen Dm-NME ermöglicht weltweit erstmalig rückgeführte Drehmomentmessungen bis  $5\text{ MN} \cdot \text{m}$ . Dies erlaubt die Kalibrierung von entsprechenden Drehmoment-Transferaufnehmern für industrielle Anwendungen. Die Anlage wird von der PTB entwickelt und gebaut. Ein wesentlicher Schwerpunkt liegt im Bereich der Forschung, insbesondere können Fragestellungen zum Ausbau von Windenergieanlagen mit noch größeren Leistungen bis  $20\text{ MN} \cdot \text{m}$  messtechnisch untersucht werden. So ermöglicht die Anlage zusätzlich die Erzeugung von Biegemomenten, Axialkräften und dynamischen Anregungen bis  $3\text{ Hz}$ . Damit wäre es erstmalig möglich, eine metrologische Charakterisierung von dynamischen Einflüssen im  $(\text{MN} \cdot \text{m})$ -

## Competence Center for Wind Energy

The so-called Competence Center for Wind Energy (CCW) is being constructed on the premises of PTB. Its technical focal points are a large coordinate measuring machine with a measuring volume of  $5\text{ m} \times 4\text{ m} \times 2\text{ m}$ ; a torque standard machine (Dm-NME) for traceability of torques of up to  $5\text{ MN} \cdot \text{m}$  (expandable to  $20\text{ MN} \cdot \text{m}$ ); and a system for calibration of wind Lidar systems. This center, the only one of its kind in the world, will be used to conduct research on and implement new measuring wind energy systems (WES). At the same time, PTB's service offer is being considerably expanded.

### • Coordinate metrology

The goal of constructing the CCW is to ensure reliable, high-precision measurements of large components (especially large gear components for WES) for the first time ever and in a sustainable way. As planned, the large coordinate measuring machine that has three moveable Cartesian axes will also be equipped with a rotary table. It is particularly suitable for measuring rotationally symmetrical components such as gears, rotor/stator components and bearing rings. Furthermore, the use of traceable laser interferometers allows the measurement accuracy of the system to be markedly improved when compared to commercial coordinate measuring machines. In this way, the geometrical errors of this measuring machine and the deformations caused by temperature effects can be better compensated for. For example, in the future, the anticipated measurement uncertainty for components with a diameter of  $4\text{ m}$  will be better than  $10\text{ }\mu\text{m}$ .

### • Torque measuring technology

The construction of the new Dm-NME will allow the world's first traceable torque measurements of up to  $5\text{ MN} \cdot \text{m}$  to be performed. This, in turn, will make it possible to calibrate corresponding torque transfer transducers for industrial applications. The system is being developed and constructed by PTB. An important focus is on research – specifically, on the metrological investigation of issues related to enhancing WES to achieve even higher levels of performance of up to  $20\text{ MN} \cdot \text{m}$ . For example, the system will also enable bending moments, axial forces and dynamic excitations of up to  $3\text{ Hz}$ , thereby making it possible for the first time to realize a metrological characterization of dynamic influences in the

Drehmomentbereich bzw. auch im MN-Kraftbereich zu untersuchen. Durch diese simultanen Belastungen können künftig Mehrkomponentenaufnehmer für Kraft und Drehmoment praxisnah rückgeführt kalibriert werden.

• **Windkanalmesseinrichtung**

Die Windkanalmesseinrichtung ermöglicht erstmals grundlegende systematische Untersuchungen zur Validierung eines neuartigen Lidar-Windfernmessverfahrens. Hierzu wird die Messunsicherheitsbilanz des als Transfernormal entwickelten bistatischen PTB-Wind-Lidar-Systems für Windgeschwindigkeitsmessungen mit höchster Ortsauflösung und Genauigkeit in der Windkanalmesseinrichtung eingehend analysiert. Dabei genügt sie den hohen Anforderungen einer Kalibriereinrichtung hinsichtlich der generierten Strömungsqualität und der messtechnischen Rückführung der Strömungsgeschwindigkeit mittels Laser-Doppler-Anemometer als Bezugsnorm.

Deutsche Unternehmen werden vom Bau des Kompetenzzentrums für Windenergie maßgeblich profitieren. Mit den kalibrierten Normalen und Aufnehmern können sie ihre eigenen Fertigungsprozesse erstmals rückführbar beurteilen, verbessern und die Qualität ihrer Produkte im internationalen Wettbewerb nachweisen. Das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie fördert die Anschaffung und den Aufbau der Messsysteme sowie wissenschaftliches Personal mit ca. 9,4 Mio. Euro. Zusätzlich wird die Errichtung neuer Gebäude und Infrastrukturmaßnahmen vom Haushalt der PTB finanziert. Betrieben werden die Anlagen gemeinsam von den Fachabteilungen 1 und 5.

(MN · m) torque range, as well as in the MN force range. These simultaneous loads will allow multi-component transducers to be calibrated in a traceable and practice-oriented way for force and torque.

• **Wind tunnel measuring device**

The wind tunnel measuring device will allow the first systematic investigations to take place for the validation of a novel Lidar remote measurement procedure. To do so, the uncertainty budget of the bistatic wind Lidar system for wind speed measurements (developed by PTB as a transfer standard) will be analyzed thoroughly at a very high spatial resolution and accuracy in the wind tunnel measuring device. By doing so, it will fulfill the strict requirements placed on calibration facilities concerning the quality of the flow generated and concerning the metrological traceability of the flow velocity using a laser Doppler anemometer as a reference standard.

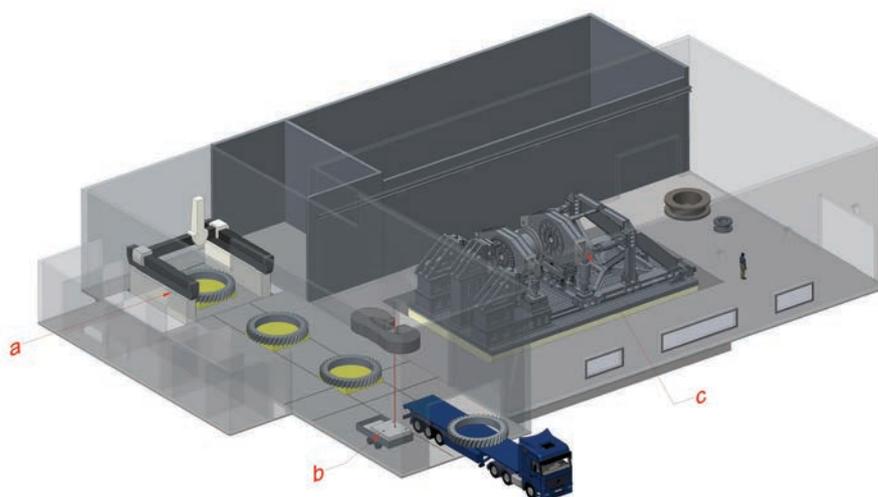
German companies will benefit considerably from the construction of the CCW. By means of the calibrated standards and transducers, they will be able to perform the first traceable evaluations and improvements of their own manufacturing processes, and to demonstrate the quality of their products on the competitive international market. The German Federal Ministry for Economics and Energy is sponsoring the purchase and construction of the measuring systems and the hiring of scientific personnel with funding amounting to around 9.4 million euros. In addition, new buildings will be constructed and new infrastructural measures set up with funds from the budget of PTB. These systems will be operated jointly by Departments 1 and 5.

Kompetenzzentrum Windenergie der PTB:

- a) Koordinatenmessgerät
- b) Windkanal zur Kalibrierung von Wind-Lidar-Systemen
- c) Drehmomentnormalmeseinrichtung

Competence Center for Wind Energy at PTB:

- a) Coordinate measuring machine
- b) Wind tunnel for calibration of wind Lidar systems
- c) Torque standard machine



### Das Quanten-Ampere ist genauer als das klassische

Im heutigen Internationalen Einheitensystem, dem SI, ist die elektrische Basiseinheit Ampere über die Kraft zwischen zwei stromdurchflossenen Leitern definiert. Dieses „klassische Ampere“ kann mit einer Messunsicherheit von etwa  $0,3 \mu\text{A}/\text{A}$  realisiert werden. Im revidierten SI, dessen Einführung für 2018 geplant ist, soll das Ampere genauer werden. Im neuen Einheitensystem wird die Stromstärkeeinheit Ampere über den Wert der Elementarladung  $e$  definiert. Für eine direkte Realisierung dieser Definition treibt man einzelne Elektronen durch eine extrem schmale Leiterbahn mit Dimensionen im Nanometerbereich. In der PTB wurden in den letzten Jahren solche als Einzelelektronenpumpen bezeichnete Bauelemente auf der Basis von Halbleitermaterialien entwickelt und im Reinraumzentrum hergestellt. Betreibt man solche Pumpen bei einer Taktfrequenz  $f$ , erwartet man, dass ein Strom der Stärke  $I = e \cdot f$  erzeugt wird. Für  $f = 1 \text{ GHz}$  beträgt die Stromstärke etwa  $160 \text{ pA}$ . Solche kleinen Ströme ließen sich lange Zeit nur mit Messunsicherheiten von  $1 \mu\text{A}/\text{A}$  messen. Die Theorie sagt voraus, dass quantisierte Ströme aus Halbleiter-Einzelelektronenpumpen Messunsicherheiten aufweisen können, die deutlich unter  $1 \mu\text{A}/\text{A}$  liegen.

Zur Verifizierung dieser Vorhersage wurde in langjähriger Entwicklungsarbeit ein spezieller Messverstärker entworfen und realisiert, der den kleinen quantisierten Strom zunächst etwa tausendfach verstärkt und ihn dann mittels eines Transimpedanzverstärkers in eine leichter zu messende Spannung wandelt. Durch Rückführung auf einen Quanten-Hall-Widerstand wird die Präzision dieses Teils der Messkette sichergestellt. Zur Messung der Spannung wird ein weiteres Quantennormal eingesetzt, ein Josephson-Quantenvoltmeter.

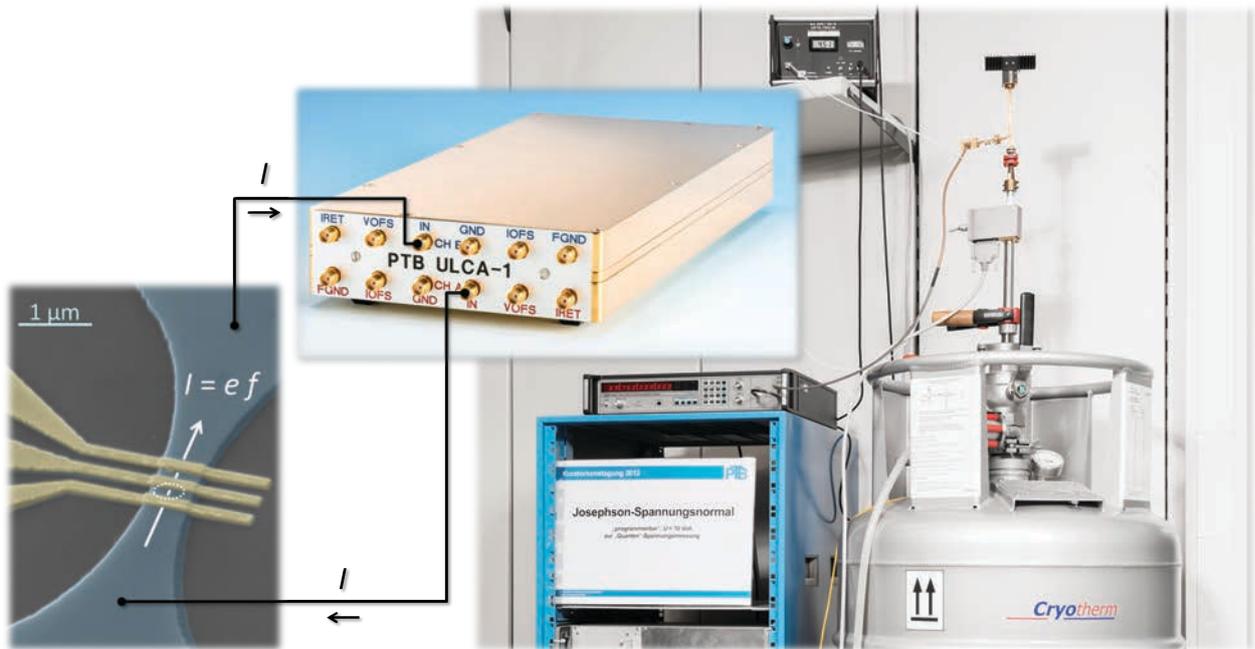
Die Abbildung zeigt schematisch die Messung des quantisierten Stromes aus einer Halbleiter-Einzelelektronenpumpe mit der neu entwickelten Mess-technik. Nach Optimierung aller Teile der Messkette konnte gezeigt werden, dass ein quantisierter Strom der Stärke  $I = 96 \text{ pA}$  innerhalb einer Messunsicherheit von nur  $0,16 \mu\text{A}/\text{A}$  mit dem erwarteten Wert  $I = e \cdot f$  übereinstimmte. Die in einer relativ kurzen Messzeit von 21 Stunden erreichte Genauigkeit stellt eine Rekordmarke für Halbleiter-Einzelelektronenpumpen dar und belegt eindrucksvoll die Qualität aller eingesetzten Quantennormale. Das Ergebnis bestätigt frühere Messungen mit einer Messunsicherheit von  $0,20 \mu\text{A}/\text{A}$ . Der PTB ist mit diesen Ar-

### The quantum ampere is more precise than the conventional ampere

In the current International System of Units (SI), the electrical base unit – the ampere – is defined as the force between two current-carrying conductors. This “conventional ampere” can be realized with a measurement uncertainty of around  $0.3 \mu\text{A}/\text{A}$ . In the revised SI, whose introduction is planned for 2018, the ampere is to become more precise. In the new system of units, the ampere – the unit of electric current – will be defined by means of the value of the elementary charge  $e$ . To directly realize this definition, single electrons are propelled through an extremely narrow conductor whose dimensions are in the nanometer range. Over the past several years, components known as single-electron pumps have been developed at PTB on the basis of semiconductor materials and manufactured in its Clean Room Center. If the pumps are operated at a clock frequency  $f$ , it is expected that a current  $I = e \cdot f$  will be generated. For  $f = 1 \text{ GHz}$ , the current is around  $160 \text{ pA}$ . For many years, such small currents were measurable only with uncertainties of  $1 \mu\text{A}/\text{A}$ . Theory predicts that quantized currents from semiconductor single-electron pumps will have uncertainties well below  $1 \mu\text{A}/\text{A}$ .

To verify this prediction, a special measurement value amplifier was designed and realized over several years of development work; this measurement value amplifier initially amplifies the small, quantized current by around 1000 times and then transforms it into a current that can be measured more easily by a transimpedance amplifier. Traceability to a quantum Hall resistance ensures the precision of this part of the measuring chain. To measure the voltage, another quantum standard is used: a Josephson quantum voltmeter.

The image below contains a schematic representation of the measurement of the quantized current from a semiconductor single-electron pump by means of the newly developed measurement technology. After optimizing all elements of the measuring chain, it was possible to show that a quantized current  $I = 96 \text{ pA}$  agreed with the expected value  $I = e \cdot f$  within a measurement uncertainty of only  $0.16 \mu\text{A}/\text{A}$ . The accuracy obtained in a relatively short measuring time of 21 hours is a new record for semiconductor single-electron pumps and is impressive proof of the quality of all of the quantum standards that were used. The result confirms earlier measurements that had an uncertainty of  $0.20 \mu\text{A}/\text{A}$ . This work has allowed PTB to successfully prove that



Halbleiter-Einzelelektronenpumpe (links), angeschlossen an einen hochgenauen Strom-Spannungswandler ULCA (Mitte) in Kombination mit einem Josephson-Spannungsnormal zur Spannungsmessung (rechts). Alle Bauteile und Geräte wurden von der PTB entwickelt.

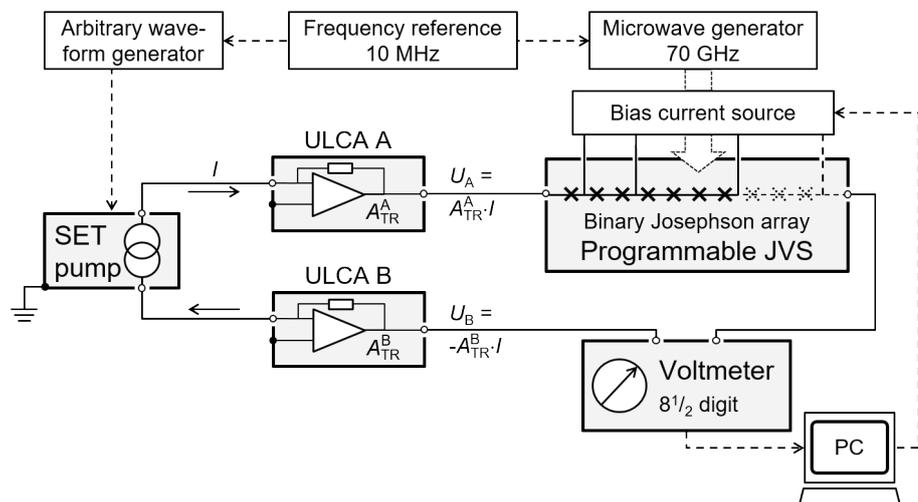
Semiconductor single-electron pump (left), connected to a high-precision current/voltage transformer ULCA (center) combined with a Josephson voltage standard for measuring voltage (right). All components and devices were developed by PTB.

beiden der Nachweis gelungen, dass das „Quanten-Ampere“ mit einer geringeren Messunsicherheit dargestellt werden kann als das klassische Ampere im heutigen SI – ein Meilenstein auf dem Weg zur geplanten Revision des Internationalen Einheitensystems.

the “quantum ampere” can be realized with a smaller measurement uncertainty than the conventional ampere in the current SI – a milestone on the path to the planned revision of the International System of Units.

Schematische Darstellung des Messaufbaus mit zwei Stromverstärkern (ULCA A und ULCA B), die in beiden Zuleitungen zur Einzelelektronenpumpe (SET-Pumpe) als Strom-Spannungswandler eingesetzt werden. In Kombination mit einem programmierbaren Josephson-Spannungsnormal misst das Voltmeter die Differenz der Ausgangsspannungen  $U_A$  und  $U_B$  beider Stromverstärker. Ein Frequenznormal regelt sowohl den Generator für die Spannungspulse, mit dem die Einzelelektronenpumpe betrieben wird, als auch die Mikrowellenquelle des Josephson-Spannungsnormal. Der systematische Beitrag dieses Aufbaus zur Messunsicherheit der Stromstärkemessung beträgt nur  $0,084 \mu A/A$ .

Schematic representation of the measurement set-up, with two current amplifiers (ULCA A and ULCA B) that are used as current/voltage transformers in the two current supply lines that lead to the single-electron pump (SET pump). In combination with a programmable Josephson voltage standard, the voltmeter measures the difference between the two current amplifiers' output voltages  $U_A$  and  $U_B$ . A frequency standard controls both the voltage-pulse generator that drives the single-electron pump, and the microwave source of the Josephson voltage standard. The systematic contribution of this set-up to the uncertainty of the current measurement is only  $0.084 \mu A/A$ .



**Isotopische Homogenität des Silizium-Kristalls „AVO28“ experimentell bestätigt**

Ziel des „Avogadro-Projektes“ ist es, mit Blick auf die Neudefinition des Einheitensystems, die Avogadro-Konstante mit einer Messunsicherheit im Bereich von besser als  $1 \cdot 10^{-8}$  neu zu bestimmen. Eine Voraussetzung hierfür ist die Messung der molaren Masse  $M(\text{Si})$  des Siliziums mit einer relativen Messunsicherheit von  $< 5 \cdot 10^{-9}$ . Dieser Wert muss neben der chemischen Präparation und massenspektrometrischen Messung auch isotopische Inhomogenitäten mit berücksichtigen. Die systematische Untersuchung örtlicher Variationen der molaren Masse im Kristall AVO28 ergab eine relative Messunsicherheit der molaren Masse von  $4,4 \cdot 10^{-9}$ . Gleichzeitig konnte erstmalig die notwendige Homogenität des Kristalls experimentell nachgewiesen werden. Wegen der Relevanz dieser Arbeit wurde sie in die „Highlights Collection 2015“ der Zeitschrift *Metrologia* aufgenommen.

Verbesserte Messungen der molaren Masse des Silizium-Einkristalls „AVO28“, der sich durch eine hohe Anreicherung hinsichtlich des Isotops  $^{28}\text{Si}$  von  $x(^{28}\text{Si}) > 0,9999$  mol/mol auszeichnet, wurden in der Arbeitsgruppe 3.11 der PTB mit dem Ziel durchgeführt, mögliche lokale Variationen der molaren Masse zu quantifizieren. Wegen der Relevanz im Zusammenhang mit der geplanten Neudefinition der SI-Einheiten Kilogramm und Mol basierend auf Naturkonstanten (wie z. B. der Avogadrokonstanten  $N_A$ ) wurden insgesamt 14 einzelne Proben von 3 axialen mit jeweils 4 bis 5 benachbarten radialen Positionen untersucht (Bild 1). Neben  $M(\text{Si})$  wurden in allen 14 Proben auch die Stoffmengenanteile  $x(^i\text{Si})$  der einzelnen Isotope  $^{28}\text{Si}$ ,  $^{29}\text{Si}$  und  $^{30}\text{Si}$

**Isotopic homogeneity of “AVO28” silicon crystal experimentally confirmed**

In consideration of the redefinition of the SI, the goal of the Avogadro project is to re-determine the Avogadro constant with a measurement uncertainty in the range of better than  $1 \cdot 10^{-8}$ . To achieve this goal, it is necessary to measure the molar mass  $M(\text{Si})$  of silicon with a relative measurement uncertainty of  $< 5 \cdot 10^{-9}$ . In addition to the chemical preparation and the mass-spectrometric measurement, this value also has to take isotopic inhomogeneities into account. The systematic investigation of local variations of the molar mass in the AVO28 crystal resulted in a relative measurement uncertainty associated with the molar mass of  $4.4 \cdot 10^{-9}$ . At the same time, it was possible to experimentally demonstrate the necessary homogeneity of the crystal for the first time. Because of the relevance of this work, it was included in the “Highlights Collection 2015” of the journal *Metrologia*.

Improved measurements of the molar mass of the AVO28 silicon single crystal, which exhibits a high enrichment regarding the  $^{28}\text{Si}$  isotope of  $x(^{28}\text{Si}) > 0,9999$  mol/mol, were performed by PTB Working Group 3.11 with the goal of quantifying possible local variations of the molar mass. Due to their relevance in connection with the planned redefinition of the SI units “kilogram” and “mole” (as based on fundamental constants such as the Avogadro constant,  $N_A$ ), a total of 14 individual samples were investigated from 3 axial positions, each of which had 4 to 5 adjacent radial positions (Fig. 1). In addition to  $M(\text{Si})$ , the amount-of-substance fractions  $x(^i\text{Si})$  of the individual isotopes  $^{28}\text{Si}$ ,  $^{29}\text{Si}$  and  $^{30}\text{Si}$  were also determined. Various experimental improvements,

Bild 1: Lage und Bezeichnung der untersuchten Einzelproben im AVO28-Einkristall.

Fig. 1. Position and identification of the individual samples investigated in the AVO28 single crystal.

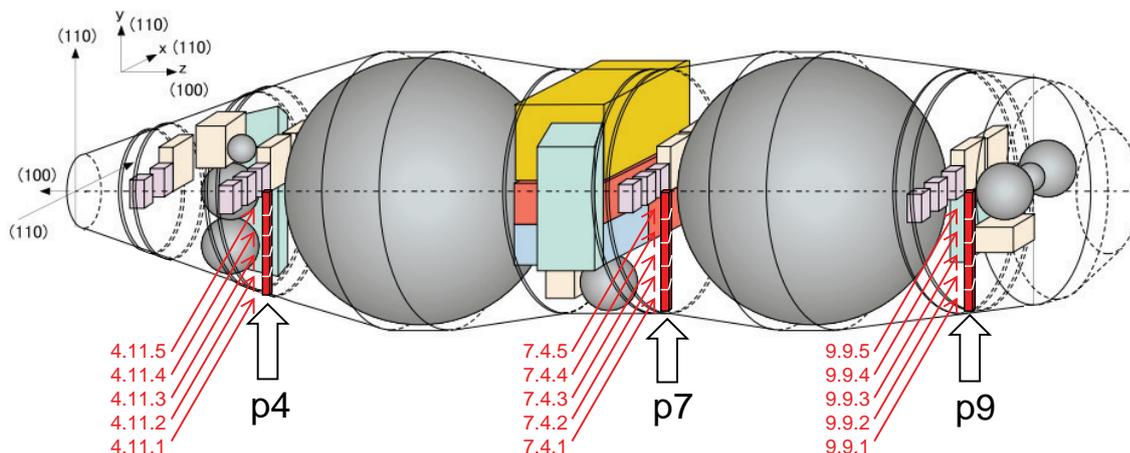
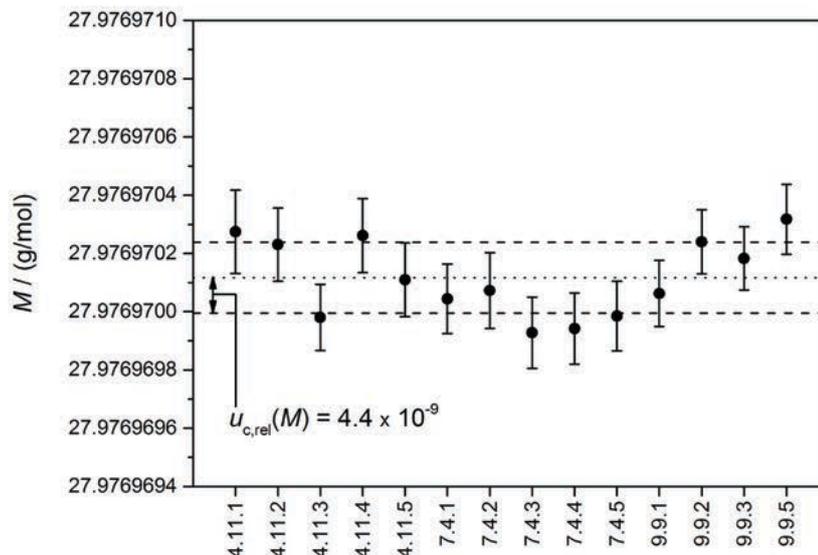


Bild 2: Molare Masse  $M(\text{Si})$  im Silizium-Einkristall AVO28 als Funktion des Ortes im Kristall, bestimmt anhand von 14 Einzelproben, die von 3 axialen mit jeweils 4 bis 5 radialen Positionen stammen

Fig. 2. Molar mass  $M(\text{Si})$  in the AVO28 silicon single crystal as a function of the location in the crystal, determined by means of 14 individual samples that originate from 3 axial positions, each of which has 4 to 5 radial positions



bestimmt. Diverse experimentelle Verbesserungen in Kombination mit einer optimierten Auswertung ermöglichten es, die Messunsicherheiten für die Ergebnisse einer einzelnen Probe auf ein bislang unerreichtes Maß abzusenken, sodass eventuelle lokale Inhomogenitäten des Isotopenmusters aufgelöst werden können.

Die mittlere molare Masse über alle 14 Proben beträgt  $M(\text{Si}) = 27,976\,970\,13(12)$  g/mol mit einer relativen kombinierten Messunsicherheit von  $u_{c,\text{rel}}(M) = 4,4 \cdot 10^{-9}$  (Bild 2). Dieses Ergebnis stimmt erstaunlich gut mit zuvor von der PTB publizierten – und vom NIST (National Institute of Standards and Technology, USA) und NMIJ (National Metrology Institute of Japan) bestätigten – Resultaten überein. Innerhalb der Messunsicherheiten wurde keine signifikante Variation der molaren Masse und der Stoffmengenanteile der Isotope  $^{28}\text{Si}$  und  $^{29}\text{Si}$  als Funktion des Ortes im AVO28-Kristall gefunden. Im Fall des Isotops  $^{30}\text{Si}$  wurden minimale Variationen knapp oberhalb der Messunsicherheit beobachtet. Inwieweit dies tatsächlich eine Eigenschaft des Kristalls darstellt oder aber auf experimentelle Unzulänglichkeiten zurückgeführt werden muss, ist der Gegenstand aktueller Experimente.

Zusammenfassend heißt dies, dass die isotopische Homogenität des AVO28-Kristalls mehr als ausreichend ist für die Angabe der molaren Masse mit einer relativen Messunsicherheit von  $< 5 \cdot 10^{-9}$  und damit wiederum für die Neubestimmung der Avogadro-Konstante mit der erforderlichen kleinen Messunsicherheit.

together with an optimized evaluation, made it possible to reduce the measurement uncertainties for the results of an individual sample to a level previously unmatched; as a result, possible local inhomogeneities of the isotopic pattern can be resolved.

The mean molar mass across all 14 samples is  $M(\text{Si}) = 27.976\,970\,13(12)$  g/mol with a relative combined uncertainty of  $u_{c,\text{rel}}(M) = 4.4 \cdot 10^{-9}$  (Fig. 2). This result agrees well with results published previously by PTB and confirmed by NIST (National Institute of Standards and Technology, USA) and NMIJ (National Metrology Institute of Japan). Within the measurement uncertainties, no significant variation of the molar mass or of the amount-of-substance fractions of the  $^{28}\text{Si}$  and  $^{29}\text{Si}$  isotopes was found as a function of the location in the AVO28 crystal. For the  $^{30}\text{Si}$  isotope, minimal variations were observed just above the measurement uncertainty. Current experiments are investigating the extent to which this actually represents a property of the crystal or whether it should be attributed to experimental shortcomings.

In sum, this means that the isotopic homogeneity of the AVO28 crystal is more than sufficient for the determination of the molar mass with a relative measurement uncertainty of  $< 5 \cdot 10^{-9}$ , and thus for the redefinition of the Avogadro constant.

### Interferometer aus Glasfasern vergleicht Uhren in Paris und Braunschweig

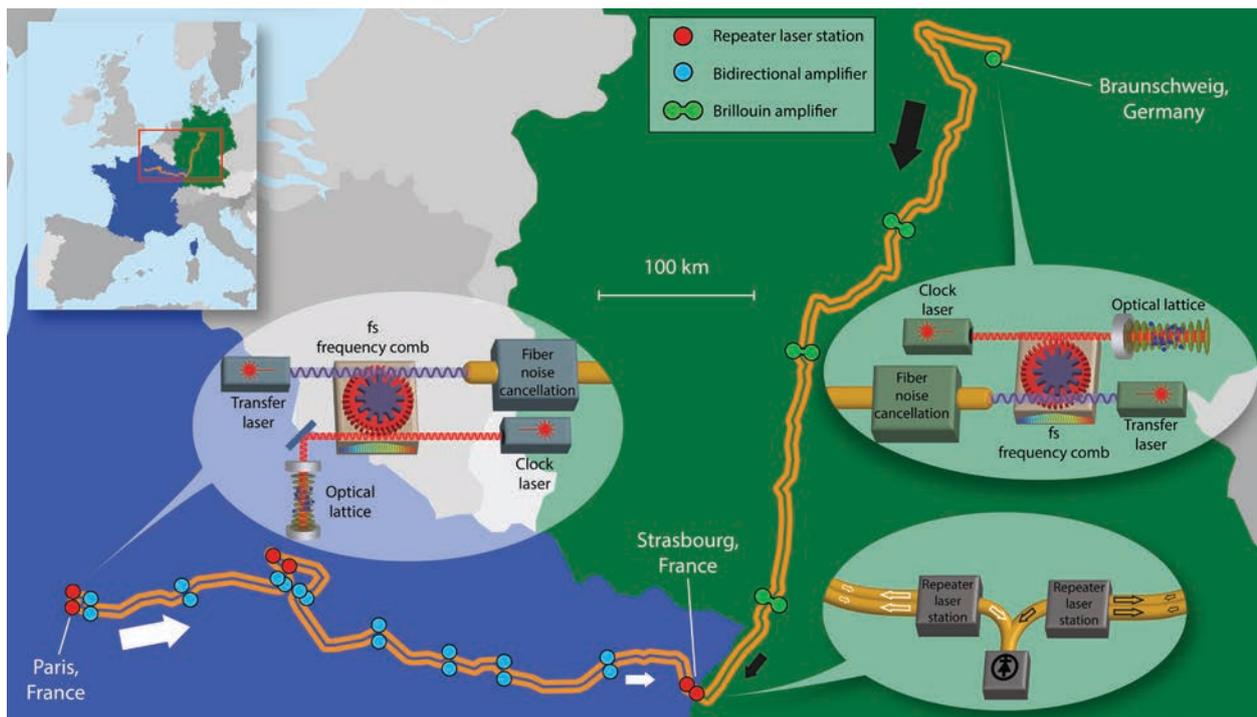
Das weltweite Netz optischer Glasfaserverbindungen zur Datenübertragung erlaubt es, auf entfernte Instrumente von mehreren Orten gleichzeitig zuzugreifen. Indem solche Verbindungen zu Glasfaser-basierten optischen Interferometern umgebaut werden, können optische Frequenzen über sehr weite Distanzen verglichen werden. An einer 1400 km langen Glasfaserstrecke von Braunschweig nach Straßburg und zurück wurde dies jetzt mit einer Auflösung von wenigen  $\mu\text{Hz}$  bestätigt, entsprechend einer relativen Frequenzauflösung von  $2 \cdot 10^{-20}$ .

Parallel hierzu hat die Uhrentwicklung spektakuläre Fortschritte gemacht. Optische Uhren, die Laserlicht auf atomare Übergänge stabilisieren, liefern die Frequenz mit einer Messunsicherheit von wenigen  $10^{-18}$ , also etwa einen Faktor 100 genauer als die derzeitigen Cs-Fontänen. Die hohe Genauigkeit ist bisher nur lokal nutzbar, weil die Übertra-

### Optical fiber interferometer compares clocks in Paris and Braunschweig

The worldwide network of optical glass fiber connections for the transmission of data allows access to remote instruments from several places at the same time. By modifying such glass fiber links to glass-fiber-based optical interferometers, optical frequencies can be compared over very long distances. This has now been implemented on a 1400 km long glass fiber link from Braunschweig to Strasbourg and back with a resolution of only a few  $\mu\text{Hz}$ , which corresponds to a relative resolution of the frequency of  $2 \cdot 10^{-20}$ .

Parallel to this, clocks have developed at a spectacular pace. Optical clocks, which stabilize the frequency of laser light to atomic transitions, supply the frequency with an uncertainty of a few  $10^{-18}$ ; this is more accurate than the current Cs fountain clocks by a factor of 100. The high precision of optical clocks has, to date, been available only locally

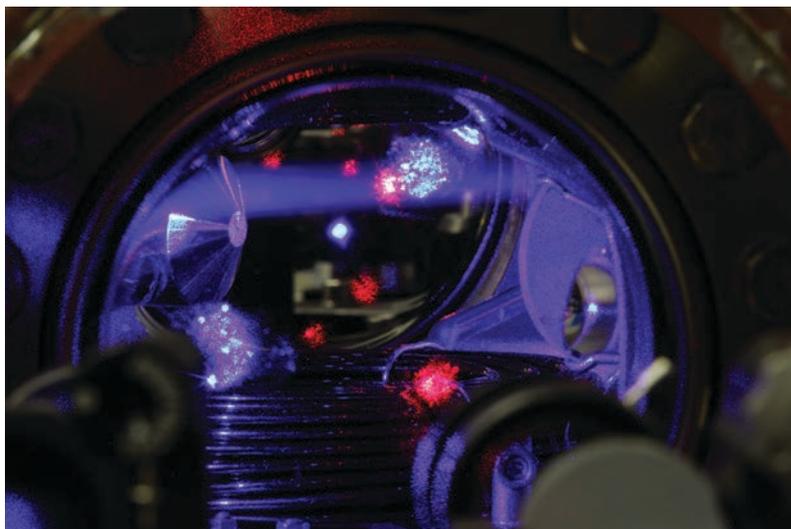


Die Frequenzen von Strontium-Gitteruhren im französischen Metrologieinstitut SYRTE (Paris) und der PTB wurden über Faserverbindungen nach Straßburg (705 km von Paris, 710 km von Braunschweig) verglichen. Eingezeichnet sind die jeweiligen Aufbauten aus Abfragelaser, optischem Gitter, fs-Frequenzkamm, Transferlaser und stabilisiertem Link. Die Differenzfrequenz beider Transferlaser wird in Straßburg gemessen.

(Abbildung aus der Originalveröffentlichung: C. Lisdat, G. Grosche, N. Quintin, C. Shi, S.M.F. Raupach et al.: A clock network for geodesy and fundamental science. Nature Communications, 7:12443 (2016), DOI 10.1038/NCOMMS12443)

The frequencies of strontium lattice clocks in the French metrology institute SYRTE (Paris) and PTB were compared by means of fiber connections to Strasbourg (705 km from Paris, 710 km from Braunschweig). The individual setups comprising an interrogation laser, an optical lattice, an fs frequency comb, a transfer laser and a stabilized link are shown. The difference frequency of the two transfer lasers is measured in Strasbourg.

(Figure from an original publication: C. Lisdat, G. Grosche, N. Quintin, C. Shi, S.M.F. Raupach et al.: A clock network for geodesy and fundamental science. Nature Communications, 7:12443 (2016), DOI 10.1038/NCOMMS12443)



Eine lasergekühlte Atomwolke in der Strontium-Atomuhr der PTB ist aufgrund des abgestrahlten Fluoreszenzlichts mit dem bloßen Auge sichtbar. Laserkühlung stellt den ersten Schritt bei der Präparation ultrakalter Atome dar, in denen anschließend der Uhrenübergang nahe 429 THz angeregt wird.

A cloud of laser-cooled atoms in the strontium atomic clock at PTB is visible to the naked eye thanks to the fluorescence light emitted by the atoms. Laser-cooling is the first step in preparing ultracold atoms, in which the clock transition near 429 THz is interrogated.

gungstechnik per Satellit eine Frequenzunsicherheit  $> 10^{-16}$  verursacht.

Die interessantesten Experimente mit optischen Uhren basieren aber auf Vergleichen zwischen ihnen, z. B. um die zeitliche Änderung von Naturkonstanten zu detektieren. Ein Frequenzvergleich zwischen zwei Uhren ergibt zudem – über die Gravitationsrotverschiebung, die das Licht zwischen den beiden Orten erfährt – die Höhendifferenz zwischen den Uhren und damit Stützpunkte für die Referenzfläche der Geodäten, das sogenannte Geoid. Im Sonderforschungsbereich 1128 („geo-Q“) wird der Forschungsansatz von Physikern und Geodäten gemeinsam verfolgt.

Zwischen der PTB und dem Partnerinstitut LNE-SYRTE in Paris wurde nun eine glasfaserbasierte Verbindung realisiert, die schnelle und präzise Uhrenvergleiche mit einer Messunsicherheit  $< 10^{-18}$  erlaubt. Frequenzfluktuationen in der Glasfaser werden um fünf Größenordnungen aktiv unterdrückt und Leistungsverluste von 200 dB ( $10^{20}$ ) mit speziellen Verstärkern ausgeglichen. PTB und SYRTE haben ihre jeweils stabilsten optischen Uhren, die auf ultrakalten neutralen Strontium-Atomen basieren, über die neue Verbindung verglichen: Bereits nach 1000 Sekunden lag die Instabilität zwischen den Uhren nahe  $2 \cdot 10^{-17}$ .

Die Höhendifferenz ihrer Standorte (22,7 Meter) wurde über die gemessene Gravitationsrotverschiebung innerhalb der kombinierten Messunsicherheit der beiden Uhren von  $5 \cdot 10^{-17}$  bestätigt. Die hervorragende Konsistenz der Messungen ist auch ein wichtiger Schritt auf dem Weg zu einer Neudefinition der Sekunde.

since satellite transmission causes a frequency uncertainty  $> 10^{-16}$ .

The most interesting experiments carried out with optical clocks are, however, based on comparing them with each other, e.g. in order to detect the time-dependent change in fundamental constants. In addition, comparing the frequency of two clocks yields the height difference between them – via the gravitational redshift which the light experiences on its way from one clock to the other. The comparison thus provides data points for the geodetic reference surface, the so-called “geoid”. This research approach is being pursued jointly by physicists and geodesists in the Collaborative Research Centre 1128 (“geo-Q”).

A glass-fiber-based connection between PTB and its partner institute LNE-SYRTE in Paris has now been established which allows fast and precise clock comparisons with an uncertainty  $< 10^{-18}$ . Frequency fluctuations in the glass fiber are actively reduced by up to 5 orders of magnitude, and power losses of 200 dB ( $10^{20}$ ) are compensated for by special amplifiers. PTB and SYRTE have compared their most stable optical clocks, which are based on ultra-cold neutral strontium atoms, via the new connection: after only 1000 seconds, the instability between the clocks was close to  $2 \cdot 10^{-17}$ .

The 22.7 m difference in height between the two institutes was confirmed by means of the gravitational redshift measured within the combined uncertainty of the two clocks of  $5 \cdot 10^{-17}$ . The excellent consistency of the measurements is also an important step towards the redefinition of the second.

## Geradheitsmessungen am Nanometerkomparator mit 2 nm Unsicherheit

Aus den steigenden Anforderungen an die Positioniergenauigkeit von mehrachsigen Fertigungs- und Messmaschinen resultiert die Forderung, auch die jeweils verwendeten Koordinaten- bzw. Geradheitsreferenzen mit geringerer Messunsicherheit kalibrieren zu können. Hierzu wurde der Nanometerkomparator weiterentwickelt, um neben den Positionsabweichungen von Längenteilungen auch deren Geradheitsabweichungen mit Messunsicherheiten im einstelligen Nanometerbereich zu bestimmen. Der Nanometerkomparator ist das nationale Normal für die Weitergabe der Einheit Meter durch die Kalibrierung von Strichmaßstäben, Photomasken und Encodersystemen mit einer Länge von bis zu 550 mm. Bei der Kalibrierung werden die Teilungsstrukturen der Messobjekte optisch angestastet, während die Messobjekte selbst auf einem luftgelagerten Messschlitten mit konstanter Geschwindigkeit bewegt werden und die Position des Messschlittens hierbei mit einem Vakuum-Verschiebeinterferometer hochgenau bestimmt wird.

Um die horizontalen Führungsfehler des Messschlittens von der gesuchten Geradheitsabweichung des Messobjektes zu trennen, wird ein Fehlerseparationsverfahren benötigt. Am Nanometerkomparator wurden das erweiterte „Traceable Multi-Sensor (TMS)“-Verfahren sowie ein Umschlagverfahren realisiert. Dafür wurde der Komparator mit einem neuen Maßstabträger aus Zerodur mit aufgebrachtem Langspiegel und drei zusätzlichen Interferometern ausgestattet. Die beiden realisierten Methoden der Geradheitsmetrologie wurden durch vergleichende Messungen eines Geradheitsenco-

## Straightness measurements at the nanometer comparator with 2 nm uncertainty

The increasing demands placed on the positioning accuracy of multiaxial manufacturing and measuring machines lead to the requirement that the coordinate and straightness references have to be calibrated with small uncertainties. For this purpose, the nanometer comparator has been further improved in order to determine, in addition to the position deviations of length graduations, their straightness deviations with uncertainties in the single-digit nanometer range. The nanometer comparator is the national standard for the dissemination of the unit “meter” by the calibration of line scales, photo masks and encoder systems with a length of up to 550 mm. During the calibration, the graduation structures of the measurement objects are optically probed, while the measurement objects themselves are moved with constant speed on a carriage with air bearings, and the position of the carriage is precisely determined by means of a vacuum displacement interferometer.

To separate the horizontal guiding errors of the carriage from the desired straightness deviation of the measurement object, an error separation method is required. At the nanometer comparator, the extended “Traceable Multi-Sensor (TMS)” method as well as a reversal method have been realized. For this purpose, the comparator was equipped with three additional interferometers and with a new scale carrier made of Zerodur, with a long mirror applied to it. The two realized methods of straightness metrology were evaluated by comparing measurements of a straightness encoder system having a graduation period of 512 nm and a length of the grating of

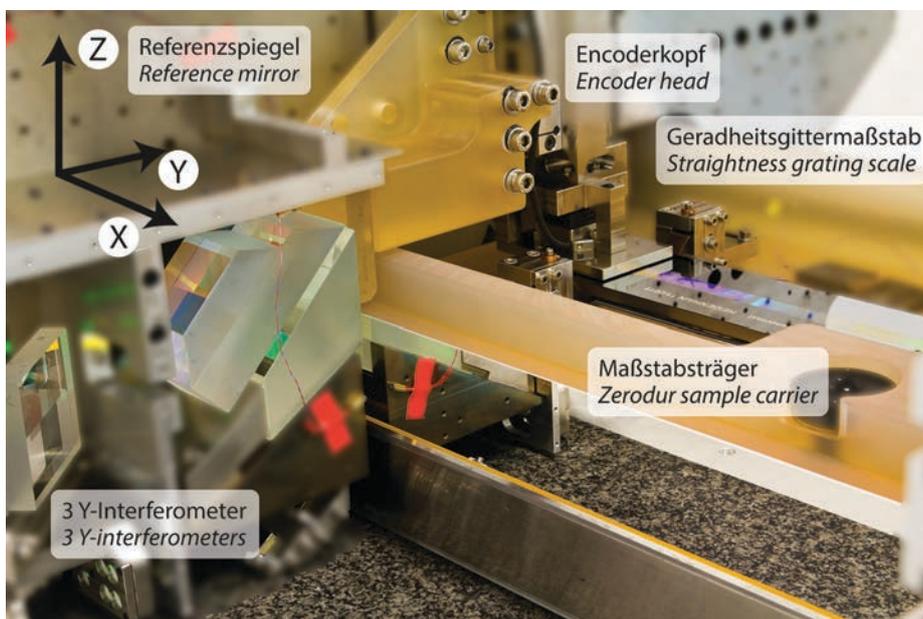
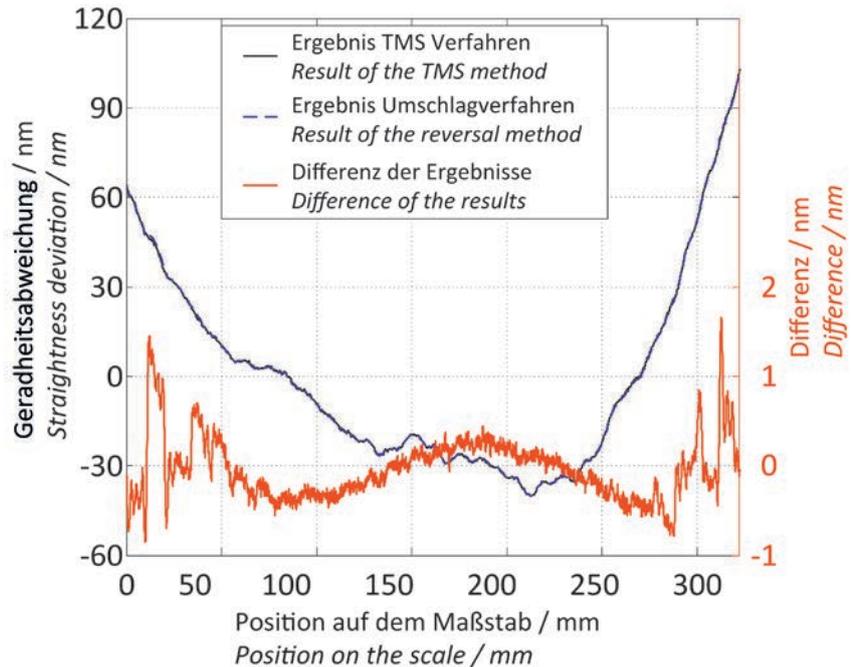


Bild 1: Geradheitsmessung eines Encodersystems am Nanometerkomparator auf Basis der ergänzten drei Verschiebeinterferometer

Figure 1: Straightness measurement of an encoder system at the nanometer comparator on the basis of the additional three displacement interferometers

Bild 2: Die Geradheitsabweichungen des Gittermaßstabes wurden mit zwei unterschiedlichen Fehlerseparationsverfahren (TMS-Verfahren und Umschlagverfahren) ermittelt.

Figure 2: The straightness deviations of the grid scale were determined by means of two different error separation methods (TMS method and reversal method).



dersystems mit einer Teilungsperiode von 512 nm und einer Messlänge von 322 mm evaluiert. Die zwei unterschiedlichen Fehlerseparationsverfahren ergaben im Rahmen ihrer Messunsicherheiten die gleichen Ergebnisse, welche bei der ermittelten Geradheitsabweichung des Maßstabes von  $\pm 72$  nm um weniger als  $\pm 1,3$  nm voneinander abwichen. Somit konnte der gitterbasierte Geradheitsmaßstab mit einer erweiterten Messunsicherheit von unter 2 nm kalibriert werden.

Mit dem an der PTB entwickelten TMS-Verfahren kann die benötigte Messzeit deutlich gesenkt werden, da im Vergleich zum Umschlagverfahren nur eine einzige Maßstabauflage erforderlich ist. Mit der erweiterten Funktionalität des Nanometerkomparators kann die PTB nun auch die Geradheitsabweichungen von Strukturen auf Maßstäben und Photomasken mit Messunsicherheiten im einstelligen Nanometerbereich kalibrieren und darüber hinaus auch andere Geradheitsmesssysteme, wie z. B. Geradheitsinterferometer, untersuchen. Die erreichte Messunsicherheit wurde durch die Stabilität der für die Fehlerseparationsverfahren notwendigen Referenzen begrenzt und kann zukünftig in den Subnanometerbereich verringert werden.

322 mm. Within the tolerance of their uncertainties, the two different error separation methods provided the same results which, in the case of the determined straightness deviation of the scale of  $\pm 72$  nm, deviated from each other by less than  $\pm 1.3$  nm.

Thus, it was possible to calibrate the grid-based straightness scale with an expanded uncertainty of less than 2 nm.

The TMS method developed at PTB allows the required measurement time to be clearly reduced as – in contrast to the reversal method – only one single application of the scale is necessary. The extended functionality of the nanometer comparator now allows PTB to calibrate also the straightness deviations of structures on scales and photo masks with uncertainties in the single-digit nanometer range and to investigate, in addition, other straightness measuring systems such as straightness interferometers. The uncertainty achieved was limited by the stability of the references required for the error separation procedures and can, in future, be reduced down to the sub-nanometer range.

### Ionenbeschleunigeranlage PIAF der PTB modernisiert

Die Ionenbeschleunigeranlage PIAF („PTB Ion Accelerator Facility“) der PTB besteht aus einem energievariablen CV28-Isochronzyklotron und einem elektrostatischen Beschleuniger. Sie wird vom Fachbereich 6.4 *Neutronenstrahlung* betrieben und liefert Protonen-, Deuteronen- und Alphateilchenstrahlen mit Energien je nach Teilchenart von bis zu ca. 26 MeV, die für die Erzeugung von Neutronenreferenzfeldern sowie für Experimente mit Ionenstrahlen eingesetzt werden. Bei dem elektrostatischen Beschleuniger, der den unteren Ionenenergiebereich abdeckt, handelte es sich bisher um einen inzwischen 40 Jahre alten Van-de-Graaff-Bandgenerator mit einer maximalen Beschleunigungsspannung von 3,75 MV, der aufgrund der nicht mehr verfügbaren Originalersatzteile sowie der langen Nutzungsdauer und des damit verbundenen Verschleißes nicht mehr die ursprünglichen Spezifikationen erreichte und nur noch sehr eingeschränkt genutzt werden konnte.

Ziel der Modernisierung war es deshalb, den Van-de-Graaff-Beschleuniger durch einen neuen Beschleuniger zu ersetzen, der in der Lage ist, den ursprünglichen Strahlparameterbereich wieder abzudecken und der zugleich die Nutzungsvorteile moderner Beschleunigertechnologie bietet. Die Wahl fiel auf einen Tandetronbeschleuniger der Firma High Voltage Engineering Europa BV, mit dem Protonen und Deuteronenstrahlen mit einer Maximalenergie von 4 MeV und Alphastrahlen mit einer Maximalenergie von bis zu 6 MeV mit verbesserter Energieschärfe und Energiestabilität erzeugt werden können. Der neue Beschleuniger wird deutlich weniger Wartungs- und Bedienungsaufwand erfordern und vor allem die routinemäßige Bereitstellung von Alphateilchenstrahlen und von gepulsten Strahlen zur Charakterisierung von Neutronenenergieverteilungen mit der Flugzeitmethode ermöglichen.

Im Februar 2016 wurde der alte Van-de-Graaff-Beschleuniger endgültig abgeschaltet und nach erfolgter Freigabe, ausgestellt durch die Genehmigungsbehörde, demontiert. Nach einer Renovierung des Beschleunigerraums begann im Oktober 2016 der Aufbau des neuen Beschleunigers. Zum Jahresende 2016 wurde der neue Beschleuniger nach einer intensiven Trainingsphase durch die Betriebsmannschaft vom Hersteller übernommen. Nach der noch nötigen anschließenden Sanierung der Klimaanlage im Beschleunigerbereich kann der reguläre Strahlbetrieb voraussichtlich im Sommer 2017 wieder aufgenommen werden.

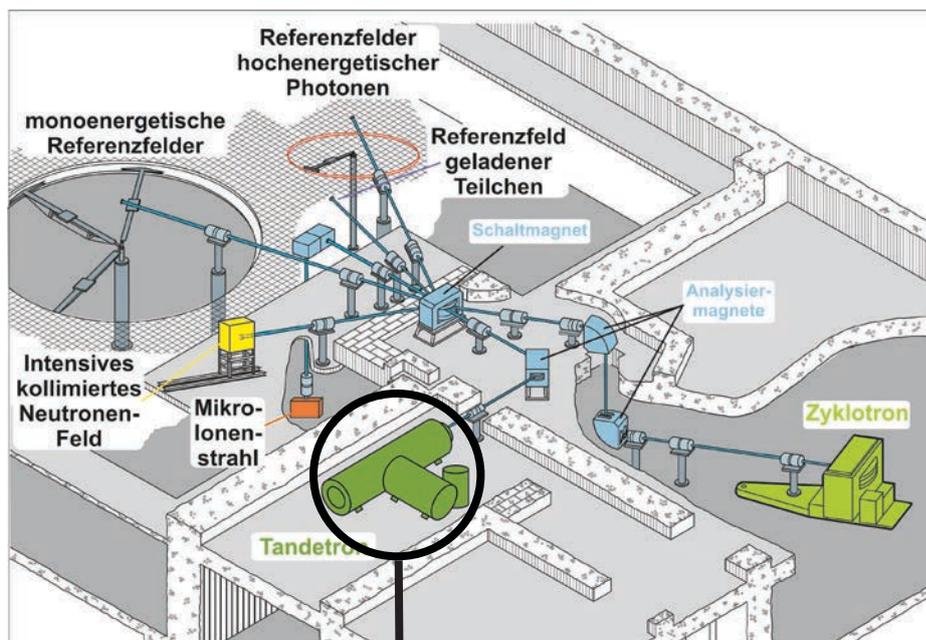
### Ion Accelerator Facility PIAF of PTB modernized

PTB's Ion Accelerator Facility (PIAF) consists of an energy-variable CV28 isochron cyclotron and an electrostatic accelerator. It is operated by Department 6.4 "Neutron Radiation" and provides proton, deuteron and alpha particle beams with energies of up to approx. 26 MeV (depending on the particle type) which are used for the generation of neutron reference fields and for experiments with ion beams. The electrostatic accelerator which has so far been used (and which is meanwhile 40 years old) is a Van de Graaff belt generator with a maximum acceleration voltage of 3.75 MV which covers the lower ion energy range. As the original spare parts are no longer available – and due to the long useful life of the accelerator and the wear associated with it, this machine no longer reached the original specifications and could be used only to a very limited extent.

It was, therefore, the objective of the modernization to replace the Van de Graaff accelerator with a new accelerator which is again in a position to cover the original beam parameter range and which offers, at the same time, the advantages of using modern accelerator technology. The choice fell on a tandetron accelerator of the High Voltage Engineering Europa BV company which allows proton beams and deuteron beams with a maximum energy of 4 MeV and alpha beams with a maximum energy of up to 6 MeV to be generated with improved energy sharpness and energy stability. The new accelerator will require considerably less maintenance and operating effort/costs and allows, in particular, the routine provision of alpha particle beams and of pulsed beams for the characterization of neutron energy distributions by the time-of-flight method.

In February of 2016, the old Van de Graaff accelerator was shut down and dismantled after permission had been given by the approving authority. After renovating the accelerator room, the installation of the new accelerator was started in October 2016. At the end of 2016, the new accelerator was handed over to PTB after the PTB staff had undergone intensive training provided by the operating team of the manufacturer. It is now still necessary to repair the air-conditioning systems in the accelerator area. After that, it will presumably be possible to resume regular beam operation in the summer of 2017.

With the acquisition of the new accelerator, in the future it will also be possible to completely cover the whole neutron energy range from approx. 2 keV to



Übersichtsbild der Ionenbeschleunigeranlage „PIAF“ der PTB. Von den beiden Beschleunigern werden die Ionenstrahlen über ein Strahlrohrsystem mit mehreren Umlenkmagneten an verschiedene Experimentierplätze geleitet. Die beiden Fotos zeigen den neuen 2-MV-Tandetronbeschleuniger während der Aufbauphase im Oktober 2016. In dem geöffneten Tank ist die sogenannte Beschleunigersäule zu sehen, in der die Ionen durch die angelegte Hochspannung beschleunigt werden.

Overview of PTB's ion accelerator facility "PIAF": From the two accelerators, the ion beams are guided via a beam line system with several deflection magnets to different experimental areas. The two photos show the new 2 MV tandetron accelerator during the construction phase in October 2016. In the open tank, the so-called accelerator column can be seen in which the ions are accelerated by the applied high voltage.

Mit der Neubeschaffung wird es in Zukunft weiterhin möglich sein, an der Ionenbeschleunigeranlage der PTB den gesamten Neutronenenergiebereich von etwa 2 keV bis zu 20 MeV lückenlos abzudecken. Die Erzeugung von monoenergetischen Neutronen in einem so großen Energiebereich stellt weltweit ein Alleinstellungsmerkmal der PTB dar, die damit ihre Rolle als eines der führenden nationalen Metrologieinstitute im Bereich der Neutronenmetrologie sichergestellt hat und auch weiterhin als kompetenter Partner bei wissenschaftlichen und gesellschaftlichen Fragen im Zusammenhang mit Neutronenstrahlung zur Verfügung steht.

20 MeV at PTB's ion accelerator facility. The generation of mono-energetic neutrons in such a large energy range is one of PTB's unique features. PTB has thus ensured its role as one of the leading national metrology institutes in the field of neutron metrology and will continue to be a competent partner in scientific and social questions in the field of neutron radiation.

### Direkt anzeigendes Astronautendosimeter

Seit November 2016 ist auf der Internationalen Raumstation ISS ein neues Strahlungsmess-System im Einsatz, das maßgeblich von der PTB entwickelt wurde. Je nach Qualität der Strahlung errechnet es die Wirkung auf lebendes Gewebe und zeigt die entsprechende Strahlungsdosis für den Astronauten ohne Zeitverzögerung an. Bisher konnten solche Daten erst nach Rückkehr der Astronauten zur Erde ausgewertet werden.

Das neue Dosimeter trägt den Namen EuCPAD (European Crew Personal Active Dosimeter) und wurde im Auftrag der Europäischen Raumfahrtorganisation ESA und unter der Leitung des Deutschen Luft- und Raumfahrtzentrums entwickelt. Es soll nicht nur Astronauten schützen, sondern wichtige Informationen für künftige Raumfahrtmissionen liefern. Da die Strahlung im Weltraum einer der begrenzenden Faktoren von Langzeitmissionen im All ist, soll geklärt werden: Wie hoch ist die Strahlung in den unterschiedlichen Modulen der ISS, wie setzt sie sich zusammen und welche Schwankungen gibt es?

EuCPAD besteht aus einem kleinen Personendosimeter und einer Speichereinheit. In Letzterer werden die vom Dosimeter ermittelten Daten wöchentlich abgelegt. Vor allem aber enthält die Speichereinheit einen gewebeäquivalenten Proportionalzähler, den die Seibersdorf Labor GmbH entwickelt hat. Es ist ein Ionisationsdetektor, der die Eigenschaften von menschlichem Gewebe simuliert. Seine Funktion ist dieselbe wie die des mobilen Dosimeters am Körper des Astronauten: Sie soll die Energiedosis bestimmen, die ein Mensch während seines Weltraumaufenthalts erhält. Der Abgleich der Daten des Dosimeters einerseits und des Proportionalzählers andererseits verifiziert die gemessenen Daten.

Der französische Astronaut Thomas Pesquet nutzt während seines Einsatzes auf der ISS ein von der PTB entwickeltes Personendosimeter, das die Strahlungsdosis sofort anzeigt. Das Bild entstand während des Trainings (Foto: NASA, James M. Blair).



### Directly indicating astronaut dosimeter

Since November 2016, a new radiation measurement system that PTB was instrumental in developing has been in use on board the International Space Station (ISS). Depending on the quality of the radiation, the system calculates the impact of the radiation on living tissue and indicates the respective radiation dose for the astronaut without time delay. Previously, it was only possible to evaluate such data after the astronauts had returned to Earth.

The new dosimeter is called EuCPAD (European Crew Personal Active Dosimeter) and was developed on behalf of the European Space Agency (ESA) and under the direction of the *Deutsches Luft- und Raumfahrtzentrum* (the national aeronautics and space research center of the Federal Republic of Germany). The dosimeter is not only designed to protect astronauts, but also to provide important information for future aerospace missions. As radiation is one of the limiting factors of long-term missions in space, the following questions have to be clarified: How high is the radiation in the different modules of the ISS, what is the radiation composed of and which fluctuations are there?

EuCPAD consists of a small personal dosimeter and a storage unit. Every week, the data acquired by the dosimeter is stored in this unit. More importantly, however, the storage unit contains a tissue-equivalent proportional counter developed by Seibersdorf Labor GmbH. This counter is an ionization detector that simulates the characteristics of human tissue.

Its function is the same as that of the mobile dosimeter worn by the astronaut: to determine the energy dose a human being is exposed to during a space flight. The comparison of the dosimeter data on the one hand and that of the proportional counter on the other verifies the measured data.

French astronaut Thomas Pesquet during his mission on ISS, using a personal dosimeter developed by PTB that immediately indicates the radiation dose. The photo was taken during training (photo: NASA, James M. Blair).

## Bestimmung der Boltzmann-Konstante abgeschlossen

Der PTB ist eine unabhängige Messung der Boltzmann-Konstante  $k$  gelungen. Damit ist eine wesentliche Bedingung des Konsultativ-Komitees für Thermometrie (CCT) erfüllt, und der Weg für die Neudefinition des Kelvins über die Festlegung der Boltzmann-Konstante ist frei. Die abschließenden Messungen von  $k$  mit dem Dielektrizitätskonstanten-Gasthermometer besitzen eine relative Messunsicherheit von 1,9 ppm. Dies ist im Vergleich zur Messunsicherheit von 15 ppm zu Beginn des Projekts im Jahre 2007 eine beachtliche Reduktion um einen Faktor 8.

Mit der alternativen Messmethode, dem akustischen Gasthermometer, wurde  $k$  schon vor etwa 30 Jahren mit einer relativen Messunsicherheit von 1,8 ppm bestimmt. Im letzten Jahrzehnt konnte diese Methode nun an verschiedenen metrologischen Instituten verfeinert werden, wobei das genaueste Ergebnis eine um den Faktor zwei reduzierte Messunsicherheit hat. Mit diesen Ergebnissen wird die erste Bedingung des CCT für die Neudefinition erreicht, einen gemittelten Wert für die Boltzmann-Konstante mit einer Unsicherheit unter 1 ppm zu erhalten.

Die PTB hatte sich schon zu Beginn des Projektes vor über 10 Jahren zur metrologischen Absicherung das Ziel gesetzt, die Ergebnisse der akustischen Gasthermometrie durch eine unabhängige Methode mit vergleichbarer Messunsicherheit zu überprüfen. Sie setzt die Dielektrizitätskonstanten-Gasthermometrie ein, die auf der In-situ-Bestimmung der Dichte des Messgases Helium beruht. Hierzu wird ausgenutzt, dass das Gas die Kapazität eines Kondensators ändert. Auf diesem Weg waren einige fundamentale Hürden zu nehmen. Die Unsicherheit der Druckmessung bei Drücken bis 7 MPa musste um einen Faktor 4 auf eine weltweit einmalige relative Messunsicherheit von 1 ppm reduziert werden. Die Messung der Kapazitätsänderungen erfordert sogar relative Unsicherheiten von einigen Milliardenstel. Darüber hinaus müssen die Materialparameter für die Kondensatoren bei den hohen Drücken an der Grenze des Messbaren bestimmt und eine Gasreinheit besser als 99,99999 % gewährleistet werden. Dies konnte nur durch verschiedene Kooperationen innerhalb der PTB und eine breite internationale Zusammenarbeit bewerkstelligt werden.

## Determination of the Boltzmann constant completed

PTB has succeeded in measuring the Boltzmann constant  $k$  independently. An essential condition laid down by the Consultative Committee of Thermometry (CCT) has thereby been met, thus paving the way for the new definition of the kelvin by fixing the value of the Boltzmann constant. The final measurements of  $k$  with the dielectric-constant gas thermometer were conducted with a relative uncertainty of 1.9 ppm. Compared to the uncertainty of 15 ppm obtained at the beginning of the project back in 2007, this represents a significant reduction by a factor of 8.

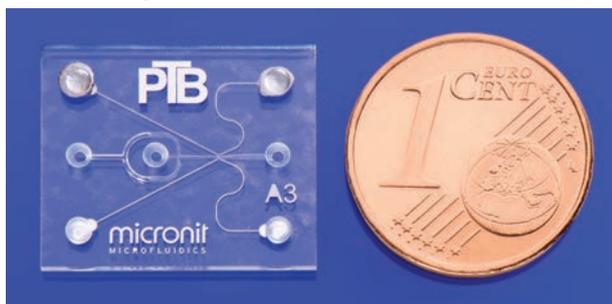
As far back as thirty years ago,  $k$  was determined with a relative uncertainty of 1.8 ppm by means of the alternative measurement method, the acoustic gas thermometer. Over the past decade, this method was further refined by various metrology institutes; the most accurate result it provided exhibited an uncertainty reduced by a factor of 2. These results allow the first condition of the CCT for the new definition to be met, namely obtaining an averaged value for the Boltzmann constant with an uncertainty below 1 ppm.

As early as the beginning of the project, some 10 years ago, PTB had already committed itself to metrologically validating the results obtained by means of acoustic gas thermometry via an independent method with a similar uncertainty. PTB employs dielectric-constant gas thermometry which is based on the in situ determination of the density of the measuring gas helium. This approach is based on the fact that the gas changes the capacitance of a capacitor. This implied a certain number of obstacles to be overcome. The uncertainty of the pressure measurement at pressures up to 7 MPa had to be reduced by a factor of 4, down to a worldwide unequalled relative uncertainty of 1 ppm. The measurement of the capacity changes even requires relative uncertainties of a few parts in a billion. Moreover, the material parameters for the capacitors must – at these high pressures – be determined at the limit of the metrologically feasible, and a gas purity of better than 99.99999 % must be ensured. This was only possible by having different departments within PTB cooperating with each other and thanks to wide international cooperation.

### Neues durchflusszytometrisches AC-Impedanzverfahren zur markierungsfreien Zelldifferenzierung

Bei durchflusszytometrischen Untersuchungen zum Kleinen Blutbild werden optische oder Impedanz-Zellzählgeräte eingesetzt, bei denen zur Messung der weißen Blutzellen die roten Blutzellen durch Hämolyse zerstört werden. Dieses Verfahren erleichtert die Konzentrationsmessung von weißen Blutkörperchen, da deren Konzentration bei Gesunden um etwa einen Faktor tausend geringer als die der roten Blutzellen ist. Bestimmte Erkrankungen, beispielsweise eine Leukämie, können jedoch zu einer Überempfindlichkeit oder Zerstörung der weißen Blutzellen beim Einsatz von Hämolyseverfahren führen. Bei anderen Blutproben, z. B. bei Säuglingen oder im Fall von Anämien, werden unter Umständen lyse-resistente Erythrozyten beobachtet, die eine fehlerfreie Unterscheidung und Konzentrationsmessung der Leukozyten verhindert.

Mit einem in der PTB entwickelten durchflusszytometrischen Messverfahren lassen sich Blutproben nach geeigneter Verdünnung analysieren, ohne die Probe durch eine Hämolyse oder Verwendung von Färbereagenzien zu verändern. Die Methode beruht auf der Messung der Änderung des komplexen Widerstandes (Impedanz) beim Durchtritt einer Blutzelle durch die Elektrodenanordnung eines mikrofluidischen Sensors. Zur eindeutigen Zellidentifikation werden zwei Wechselspannungen mit verschiedenen Frequenzen angelegt, die jeweiligen komplexen AC-Impedanzsignale gemessen und daraus die jeweilige Resistanz (Wirkwiderstand), die Reaktanz (Blindwiderstand) sowie der Betrag der Impedanz bestimmt. Durch geeignete Wahl der Frequenzen und der Messgrößen können die dem erweiterten Kleinen Blutbild zugeordneten Zellen, die roten Blutzellen, die Blutplättchen, die neutrophilen Granulozyten, die Monozyten und die Lymphozyten, im Mikro-Durchflusszytometer unterschieden werden. Damit können Untersuchungen von Blutproben bei bestimmten Patientengruppen ohne Färbungs- und Markierungsschritte vereinfacht durchgeführt werden.



### New flow-cytometric AC impedance procedure for label-free cell differentiation

In flow cytometry, the full blood count is measured applying optical or impedance-based cell-counting instruments. To determine the concentration of white blood cells (the abundance of which is a factor of approx. 1000 – compared to red blood cells), the destruction of red blood cells by hemolysis is required. In the case of certain diseases, e.g. leukemia, however, the hemolysis procedure may lead to a hypersensitivity or even to the destruction of the white blood cells. In blood samples from newborns or from anemic patients, lysis-resistant erythrocytes may be observed which impede the correct differentiation and concentration measurement of leukocytes.

The flow-cytometric procedure developed at PTB allows blood samples to be analyzed after having been suitably diluted, without modifying the sample by hemolysis or by using dyeing reagent. This method is based on the observation of the change which occurs in the complex resistance (impedance) when a blood cell passes through the electrode configuration of a microfluidic sensor. In order to identify the cells unequivocally, two alternating voltages are applied with different frequencies and each of the complex AC impedance signals is measured. From these signals, the effective resistance, the reactance and the absolute value of the impedance are determined. By choosing suitable frequencies and measurands, it is possible to differentiate in the micro-flow cytometer between the cells attributed to the full blood count including the 3-part differential white blood count, i.e. red blood cells, platelets, granulocytes, monocytes and the lymphocytes. It follows that investigations of blood samples of certain groups of patients can be carried out much more simply. Perturbing intermediate steps involving staining or labeling are not necessary.

Größenvergleich eines mikrofluidischen Sensors mit einem Eurocent

Size comparison between a microfluidic sensor and a one eurocent coin

## Fundamentale Physik für die Metrologie

In diesem Jahr wurde das neue Institut für *Fundamentale Physik für die Metrologie* an der PTB gegründet. Es beschäftigt sich mit grundlegenden physikalischen Entwicklungen, die zukünftig für die Metrologie Bedeutung gewinnen können. Innerhalb des Institutes wurden zunächst drei wesentliche Forschungsrichtungen etabliert:

**Atomphysik für die Metrologie:** Dieser Bereich beteiligt sich an der Entwicklung neuer theoretischer Ansätze zur Beschreibung der Struktur von Mehrelektronen-Atomen und deren Wechselwirkung mit elektromagnetischer Strahlung. Diese Entwicklung wird dazu dienen, das Standardmodell der fundamentalen Teilchen und Wechselwirkungen im Niederenergiebereich zu testen und die Genauigkeit atomarer Uhren zu verbessern. Dies wiederum ermöglicht neue und höchst präzise Zeit- und Längennormale. Die Untersuchungen erfolgen in enger Kooperation mit dem Institut QUEST, das sich mit experimenteller Atomphysik befasst.

**Atomtronik für die Metrologie:** Dieser Bereich beschäftigt sich mit metrologischen Anwendungen kondensierter Quantengase. Kondensierte Bose- und Fermigase versprechen zahlreiche neue metrologische Anwendungen in allen Bereichen der Physik, u. a. in der Atomtronik, einer möglichen Alternative der Elektronik für spezielle Applikationen. Mit geeigneten Computersimulationen wird untersucht, wie ob und wie übliche elektronische Bauteile (Widerstand, Induktivität oder Kapazität) in der Atomtronik realisiert werden können. Darüber hinaus beschäftigt sich das Institut mit Analoga z. B. von Josephson-Brücken.

**Magnetische Phasenübergänge und Spintronik:** Phasenübergänge sind wichtige Fixpunkte für die Definition metrologischer Skalen makroskopischer Größen wie z. B. der Temperatur. Das Institut untersucht die Charakteristika von Quantenphasenübergängen und topologischen Phasenübergängen in Spinsystemen, die sich grundlegend von klassischen Phasenübergängen unterscheiden. Dazu dienen umfangreiche Computersimulationen. Realisiert werden solche Systeme sowohl in Festkörpern wie auch neuerdings in mit Quantengasen gefüllten optischen Gittern.

Neben den eigenen Forschungsarbeiten unterstützt das neue Institut die mehr experimentell orientierten Fachabteilungen bei schwierigen, eher theoretischen Problemen und versucht, neue Wege und Ziele metrologischer Forschung aufzuzeigen.

## Fundamental physics for metrology

The new institute “Fundamental physics for metrology” was founded at PTB in this year. It studies new developments in physics which may be important for metrology in the future. Within the institute three different research directions were established:

**Atomic physics for metrology:** here the institute participates in the development of new methods to describe the structure of multi-electron atoms and their interaction with electromagnetic radiation. This research will contribute to tests of the standard model of elementary particles and their interactions at low energies, in particular it will contribute to ever more precise atomic or nuclear clocks. This will enable ultrahigh precision atomic time and length standards. The investigations are done in close collaboration with the institute “QUEST” at PTB which studies atomic spectra experimentally.

**Atomtronics for metrology:** this research direction targets metrological applications of condensed quantum gases. Such gases promise a rich set of metrological applications in all areas of physics, e.g. in atomtronics, which is an alternative to electronics for special applications. Using specialized computer codes it is investigated how standard electronic devices (resistance, inductance, or capacitance) may be implemented within atomtronics. Moreover the institute specifically studies analogs of e.g. Josephson junctions.

**Magnetic phase transitions and spintronics:** phase transitions provide important definitions of metrological scales e.g. temperature. The institute investigates characteristics of quantum and topological phase transitions in spin systems, which distinguish themselves significantly from classical phase transitions. For this purpose large scale computer simulations are developed. Experimentally such systems are realized in solid state systems as well as optical lattices filled with quantum gases.

Besides the various research activities the institute supports experimental groups within PTB to solve challenging theoretical problems. Furthermore it advises on new research direction in metrology.

### 67. Sitzung des Kuratoriums

Die jährliche Sitzung des Kuratoriums der PTB fand in diesem Jahr am 12. und 13. Mai in Braunschweig statt. Nach den Laborbegehungen im Anschluss an die einleitende offizielle Begrüßung durch den Präsidenten folgten drei Fachvorträge von Nachwuchswissenschaftlerinnen und -wissenschaftlern über ihre jüngsten Arbeiten. Dr. Friederike Stein berichtete über die „Validierung quantisierter Einzelelektronen-Stromquellen auf Sub-ppm-Level“, ein Thema, das im Hinblick auf die Realisation des neuen Ampere von Bedeutung ist. Anschließend konnte Dr. Janine Noordmann in ihrem Vortrag „Toxische Schwermetalle in Arzneimitteln – SI-rückführbare Kalibrierlösungen, eine PTB-Kooperation mit EDQM und BAM“ ein Thema mit direktem gesellschaftlichen Bezug vorstellen. Die Veranstaltung wurde von Dr. Ingo Kröger mit seinem Beitrag „Höchstgenaue laserbasierte Messungen an Referenz-Solarzellen“ abgerundet.

Am Vormittag des zweiten Sitzungstages eröffnete Stefan Schnorr als Präsident des Kuratoriums die eigentliche Sitzungsveranstaltung. Er begrüßte die neu berufenen Kuratoriumsmitglieder, mit deren Beteiligung das Gremium inzwischen einen Frauenanteil von mehr als 40 % erreicht hat. In seinem Bericht ging er auf die politischen Entwicklungen mit Relevanz für die Tätigkeitsfelder der PTB ein. Als Thema von herausgehobener Bedeutung erwähnte er dabei den digitalen Wandel der Wirtschaft.

Prof. Joachim Ullrich stellte in seinem Bericht des PTB-Präsidenten einige Höhepunkte der Arbeit

### 67<sup>th</sup> Meeting of the Kuratorium (Advisory Board)

The annual meeting of the Kuratorium (Advisory Board) of PTB took place this year in Braunschweig on 12-13 May. Following a tour of the laboratories after the official introductory greeting by the President, three lectures were given by junior scientists on their most recent work. Dr. Friederike Stein gave a report on “Validation of quantized single-electron current sources at sub-ppm level”, a subject that is significant in relation to the realization of the new ampere. Following this, Dr. Janine Noordmann presented a subject with immediate social relevance in her lecture titled “Toxic heavy metals in pharmaceutical products – SI-traceable calibration solutions, a PTB cooperation project with EDQM and BAM”. The event was brought to a close by Dr. Ingo Kröger in his presentation titled “High-precision laser-based measurements on reference solar cells”.

On the morning of Day 2 of the meeting, Stefan Schnorr, the President of the Kuratorium, opened the meeting session proper. He greeted the newly appointed members of the Kuratorium, which now consists of over 40 % women. In his report, Mr. Schnorr addressed political developments relevant to the fields of activity pursued at PTB, mentioning the digital transformation of the economy as an especially significant topic.

Mitglieder des Kuratoriums besichtigen eines der weltweit sieben Terminals, die im Rahmen der Vorbereitungen der ESA-Mission „Atomic Clock Ensemble in Space“ (ACES) zum Vergleich von Atomuhren auf der Erde und auf der Internationalen Raumstation ISS dienen sollen. Hier auf dem Dach des Meitner-Baus der PTB ist die zum Himmel gerichtete drehbare Antenne zu sehen.



Members of the Kuratorium (Advisory Board) visit one of seven terminals worldwide that are set to be used within the scope of preparations for the “Atomic Clock Ensemble in Space” (ACES), an ESA mission; ACES is designed to compare atomic clocks on the Earth and in the International Space Station (ISS). Here, the terminal’s rotating antenna, which is aimed towards the sky, can be seen on the roof of PTB’s Meitner Building.

Teilnehmer der Kuratoriums-  
tagung 2016Participants at the 2016  
Kuratorium meeting

ten des vergangenen Jahres vor, zu denen u. a. die Projekte im Zusammenhang mit der Neudefinition des Internationalen Systems der Einheiten gehören. Dabei sind die gesteckten Ziele zu neuen Realisierungsmöglichkeiten der Sekunde, des Ampere und des Kilogramms entweder bereits erreicht oder die Zielerreichung bis zum Ende der vorgesehenen Zeit in Sichtweite. Zu den metrologischen Dienstleistungen ging Ullrich auf die erfolgte Neuordnung des Mess- und Eichrechts ein und erläuterte darüber hinaus die Aktivitäten im Technologietransfer, hier insbesondere das neu aufgelegte Förderprogramm TransMeT, in dessen Rahmen Kooperationen mit KMUs unterstützt werden. Ein weiterer Themenblock betraf die Intensivierung der Zusammenarbeit mit der TU Braunschweig im Rahmen der Metrologie-Initiative Braunschweig (MIB) und des „Laboratory for emerging nanometrology“ (LENA), eines Forschungszentrums, für das in diesem Jahr der Grundstein gelegt worden ist. Die Kooperation mit der Leibniz Universität Hannover wurde durch den neuen Sonderforschungsbereich „Designed Quantum States of Matter“ (DQ-mat) unter Federführung des QUEST-Instituts gestärkt, wobei die PTB mit vier Teilprojekten involviert ist. Mit beiden Universitäten ist die PTB auch im Forschungsverbund QUANOMET aktiv, der die Themenbereiche Quantentechnologien, Nanotechnologien und Metrologie umfasst. Um auch zukünftig die notwendige Infrastruktur für Metrologie mit höchster Präzision gewährleisten zu können, wies Ullrich auf das von der PTB erarbeitete Liegenschaftskonzept hin, das vom Kuratorium deutliche Zustimmung erfuhr. Insgesamt war das Kuratorium von den Leistungen der PTB und der vorgestellten Strategie überzeugt und befürwortete ein entschlossenes Voranschreiten.

In his report as President of PTB, Dr. Joachim Ullrich presented several highlights of the work done over the past year, including projects in connection with the redefinition of the International System of Units. Here, the goals that have been set for new possibilities for realizing the second, the ampere and the kilogram either have already been reached or will be reached by the end of the time envisaged. On the subject of metrological services, Dr. Ullrich spoke about the completed reorganization of the Measures and Verification Act. He also mentioned activities in the field of technology transfer, in particular the relaunched TransMeT promotion program that supports cooperation projects with SMEs. Further discussion focused on the intensified collaboration with TU Braunschweig, within the scope of MIB (Metrology Initiative Braunschweig), and with the Laboratory for Emerging Nanotechnology (LENA) research center, construction of which began this year. The cooperation project with Leibniz Universität Hannover was enhanced by means of the “Designed Quantum States of Matter” (DQ-mat) collaborative research center (CRC), under the direction of the QUEST Institute; PTB has four sub-projects in this research center. Together with both universities, PTB is also active in the QUANOMET research association, which encompasses the fields of quantum technologies, nanotechnologies and metrology. Dr. Ullrich drew attention to the property concept that was developed by PTB in order to continue to ensure the infrastructure necessary for high-precision metrology; this concept was met with the distinct approval of the Kuratorium. Overall, the Kuratorium was satisfied with the services of PTB and with the strategy presented; the members endorsed a resolute continuation on the same path.

### Evaluation

Die PTB wurde in diesem Jahr zum zweiten Mal durch den Wissenschaftsrat evaluiert. Dabei hat die Evaluationskommission auch Augenmerk auf die Fortentwicklung seit der letzten Evaluation vor neun Jahren gelegt. Nachdem von der PTB im Frühjahr zunächst ein umfassender Bericht in Form des beantworteten Fragenkatalogs an den Wissenschaftsrat übermittelt worden war, folgte im Oktober ein dreitägiger Besuch an den Standorten in Braunschweig und Berlin. Dabei wurden sowohl die Aktivitäten der Fachlabore vorgestellt als auch Gespräche mit Vertretern verschiedener Stakeholdergruppierungen sowie Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der PTB geführt, um die fachliche und strategische Aufstellung der PTB unter die Lupe zu nehmen. Die Gutachterinnen und Gutachter des Wissenschaftsrates zeigten sich von den präsentierten Arbeitsergebnissen beeindruckt und begeistert, was nicht zuletzt dem großen Einsatz und der Motivation aller Beteiligten zuzuschreiben ist, mit denen die Kommission in Kontakt kam. Der endgültige Bericht wird zum April 2017 erwartet.

### Evaluation

This year, PTB was evaluated for the second time by the German Council of Science and Humanities (Wissenschaftsrat). The evaluation committee also focused their attention on the continued development in the nine years since the previous evaluation took place. After PTB had provided a comprehensive report to the Council of Science and Humanities in the form of a completed questionnaire at the beginning of the year, a three-day visit by the Council took place at PTB's Braunschweig and Berlin sites in October. During this visit, the activities of the specialized laboratories were presented and conversations with representatives of various stakeholder groups were held in order to provide a detailed look at the technical and strategic position of PTB. The evaluators from the Council of Science and Humanities were impressed by and enthusiastic about the work results that were presented; this reaction was due not least to the great engagement and motivation of all the participants contacted by the committee. The final report is expected for publication in April 2017.



Zur Evaluation der PTB durch den Wissenschaftsrat gehörten auch Besichtigungen der beiden Standorte im September 2016.

As part of its evaluation of PTB, the *Wissenschaftsrat* (German Council of Science and Humanities) visited both of PTB's sites in September 2016.

## Theorieprofessur „Fundamentale Physik für Metrologie“

Seit dem 1. April 2016 ist Prof. Dr. Andrey Surzhykov nach einem gemeinsamen Berufungsverfahren von TU Braunschweig und PTB zum Leiter des Instituts *Fundamentale Physik für Metrologie* ernannt. Das Institut ist eine Neugründung an der PTB mit dem Ziel, die Quantentheorie atomarer und mesoskopischer Systeme weiter zu entwickeln. Hierbei reichen die Aktivitäten des Instituts von der hochpräzisen Analyse atomarer Strukturen und Kollisionen über die Untersuchung kohärenter Prozesse in ultrakalten Quantengasen bis hin zur Modellierung von Phasenübergängen in magnetischen Systemen. Gemeinsames Ziel dieser Forschungsaktivitäten ist es, die Entwicklung neuer Metrologiestandards, die präzise Bestimmung von Naturkonstanten und die Formulierung von Tests fundamentaler Symmetrien der Natur zu unterstützen.

## Fortschritt bei LENA

Das Laboratory for Emerging Nanometrology (LENA) ist ein Forschungszentrum der Technischen Universität Braunschweig, das in enger Kooperation mit der PTB gegründet wurde und in Kooperation der beteiligten Institute bereits betrieben wird. Es ist Teil der „Metrologie-Initiative Braunschweig“ (MIB), die weitere Metrologie-Aktivitäten wie gemeinsame Berufungen sowie Doktorandenausbildungsprogramme umfasst.

Zur Stärkung des Forschungsschwerpunkts Nanometrologie baut das Land Niedersachsen für die TU Braunschweig ein neues Gebäude für LENA. Nach der Grundsteinlegung im April wurde am 22. August 2016 das Richtfest des Forschungsbaus gefeiert. Das LENA vereint aktuell Institute aus den Fakultäten Elektrotechnik, Informationstechnik, Physik (federführend), Lebenswissenschaften und Maschinenbau der Technischen Universität Braunschweig mit den Abteilungen *Elektrizität*, *Chemische Physik und Explosionsschutz* sowie *Optik und Fertigungsmesstechnik* der PTB.

Zu LENA gehören auch mehrere Nachwuchsforschergruppen. Zum 1. April 2016 ist Dr. Stefanie Kroker gemeinsam von der PTB und der TU Braunschweig als Juniorprofessorin zur Leitung der Nachwuchsgruppe „Metrologie für funktionale Nanosysteme“ berufen worden. Die Nachwuchsgruppe ist bei LENA an der Schnittstelle zwischen der PTB und der TU Braunschweig angesiedelt und soll die gemeinsamen Forschungsaktivitäten beider Institu-

## “Fundamental Physics for Metrology” theory professorship

On 1 April 2016, Dr. Andrey Surzhykov was appointed director of the “Fundamental Physics of Metrology” institute following a joint professorial appointment by TU Braunschweig and PTB. This new institute was established by PTB with the aim of further developing the quantum theory of atomic and mesoscopic systems. To this end, the activities of the institute range from the high-precision analysis of atomic structures and collisions to the investigation of coherent processes in ultra-cold quantum gases, as well as the modeling of phase transitions in magnetic systems. The joint goal of these research activities is to provide support for the development of new metrology standards, for the precise determination of fundamental constants and for the formulation of tests concerning fundamental symmetries of nature.

## Progress at LENA

The Laboratory for Emerging Nanometrology (LENA) is a research center at the Technische Universität Braunschweig founded in close collaboration with PTB; LENA is already being operated in collaboration with the participating institutes. It is part of MIB (Metrology Initiative Braunschweig), which encompasses additional metrology activities such as joint professorial appointments and training programs for doctoral students.

In order to reinforce the research focus area of nanometrology, the German state of Niedersachsen (Lower Saxony) is constructing a new building for LENA. Following the groundbreaking in April, the topping-out ceremony was held on 22 August 2016. At present, LENA unites institutes from the departments of Electrical Engineering, Information Technology, Physics (head department), Life Sciences and Mechanical Engineering at the Technische Universität Braunschweig with the divisions of Electricity, Chemical Physics and Explosion Protection at PTB.

Several groups of junior researchers are also part of LENA. On 1 April 2016, Dr. Stefanie Kroker, a junior professor, was jointly appointed by PTB and TU Braunschweig to lead the “Metrology for Functional Nanosystems” junior research group. At LENA, this group operates at the interface between PTB and TU Braunschweig, and is designed to support the joint research activities of both institutions in nanometrology. The group’s goal is to develop and verify

tionen in der Nanometrologie unterstützen. Ziel der Gruppe ist die Entwicklung und Verifizierung neuartiger nanooptischer Systeme für metrologische bzw. sensorische Anwendungen sowie die Untersuchung metrologisch relevanter Licht-Materie-Wechselwirkungsprozesse in optischen Nanostrukturen.

### **Einrichtung des Sonderforschungsbereichs DQ-mat**

Die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) hat zum 1. Juli 2016 den neuen Sonderforschungsbereich 1227 „Designte Quantenzustände der Materie (DQ-mat) – Erzeugung, Manipulation und Detektion für metrologische Anwendungen und Tests fundamentaler Physik“ an der Leibniz Universität Hannover eingerichtet. Die beteiligten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler werden daran arbeiten, die besonderen Eigenschaften von quantenmechanischen Systemen für bessere Quantensensoren wie zum Beispiel optische Uhren und Beschleunigungsmesser zu erschließen. Beteiligt sind außer der Leibniz Universität Hannover (Institut für Quantenoptik, Institut für Theoretische Physik und Institut für Didaktik der Mathematik und Physik) die PTB in Braunschweig und das Zentrum für angewandte Raumfahrttechnologie und Mikrogravitation (ZARM) der Universität Bremen. Der SFB ist auf eine Laufzeit von zwölf Jahren ausgelegt. Für die ersten vier Jahre wird die Fördersumme knapp zehn Millionen Euro betragen.

Expertinnen und Experten der drei beteiligten Institutionen aus den Forschungsschwerpunkten Viel-Teilchen-Physik, Quanteninformation, Gravitation, Quantengase und Metrologie arbeiten gemeinsam an der Entwicklung neuer Methoden zur Erzeugung, Manipulation und Detektion von Quantenzuständen. Die Untersuchung dieser Zustände erlaubt ein tieferes Verständnis der Quanteneigenschaften von Viel-Teilchen-Systemen. Damit widmet sich der neue SFB einer der größten Herausforderungen der modernen Physik.

### **Helmholtz-Preis 2016**

Am 22. Juni 2016 wurde der bedeutendste Preis der Metrologie erstmals für Forschungsarbeiten in zwei Kategorien gleichzeitig verliehen. In diesem Jahr ist die Jury des Helmholtz-Preises in der Kategorie „Grundlagen“ von der Frankfurter Arbeitsgruppe um Reinhard Dörner mit einer messtechnischen Sensation überzeugt worden. Ihr ist es gelungen, die verschwindend geringen Bindungsenergien zwi-

novel nano-optic systems for metrological/sensory applications, as well as to investigate metrologically relevant light/material interaction processes in optical nanostructures.

### **Establishment of DQ-mat Collaborative Research Center**

On 1 July 2016, the German Research Foundation (Deutsche Forschungsgemeinschaft, DFG) established the new Collaborative Research Center 1227, “Designed Quantum States of Matter (DQ-mat) – generation, manipulation and detection for metrological applications and tests of fundamental physics”, at Leibniz Universität Hannover. The participating scientists will be working on exploiting the special properties of quantum-mechanical systems in order to improve quantum sensors such as optical clocks and accelerometers. In addition to Leibniz Universität Hannover (*Institut für Quantenoptik, Institut für Theoretische Physik* and *Institut für Didaktik der Mathematik und Physik*), other participating institutions include the Center of Applied Space Technology and Microgravity (ZARM) of the University of Bremen and PTB in Braunschweig. The research center is designed to last twelve years; for the first four years, the volume of funding will be around 10 million euros.

Experts from the three participating institutions who work in the research areas of many-body physics, quantum information, gravitation, quantum gases and metrology are working together on the development of new methods for the generation, manipulation and detection of quantum states. Investigating these states makes it possible to form a more profound understanding of the quantum properties of multi-body systems. In this way, the new research center has dedicated itself to one of the greatest challenges of modern physics.

### **Helmholtz Prize 2016**

On 22 June 2016, the most distinguished prize in metrology was awarded for the first time for research work in two categories. This year, the jury of the Helmholtz Prize in the “Fundamentals” category was won over by the metrological sensation presented by the Frankfurt Working Group led by Reinhard Dörner. The group successfully measured the vanishingly small binding energies between the atoms in helium dimers and trimers. The winners in the “Applications” category are from Cambridge: Nicholas A.W. Bell and Ulrich Keyser have developed a groundbreaking new DNA analysis method by me-

Bei der Verleihung des  
Helmholtz-Preises 2016

At the awarding ceremony  
for the 2016 Helmholtz Prize



schen den Atomen in Helium-Di- und -Trimeren zu messen. Aus Cambridge kommen die Gewinner der Kategorie „Anwendungen“. Nicholas A. W. Bell und Ulrich Keyser haben eine bahnbrechende neue Methode der DNA-Analyse mit Nanoporen entwickelt, bei der maßgeschneiderte, gefaltete DNA-Moleküle eine entscheidende Rolle spielen. Die feierliche Preisvergabe fand in der PTB im Rahmen eines internationalen Symposiums statt, zu dem Messtechnikexperten aus aller Welt vor Ort waren.

### **MetroSommer 2016**

Unter dem Motto „Dein genauester Sommer!“ fand vom 1. August bis zum 30. September 2016 erstmals der PTB-MetroSommer statt. Für dieses von der PTB ausgelobte freiwillige Praktikum hatten sich über 30 Studentinnen und Studenten (von MINT-Fächern) aus ganz Deutschland beworben, von denen letztlich 14 ausgewählt wurden, um ihr Wissen in eigenen Projekten unter Beweis zu stellen. Gemeinsam mit erfahrenen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern als Mentoren hatten diese jungen Nachwuchsforscher die Gelegenheit, am Standort Braunschweig über neun Wochen hinweg u. a. selbst Atome zu fangen, magnetische Nanostrukturen zu charakterisieren, Hochfrequenzsignale zu erzeugen und zu messen, mit ultrastabilen Lasern zu arbeiten oder aber auch an Projekten der Technischen Zusammenarbeit mitzuwirken – von der Grundlagenforschung bis hin zum Transfer von Qualitätsinfrastruktur in andere Länder.

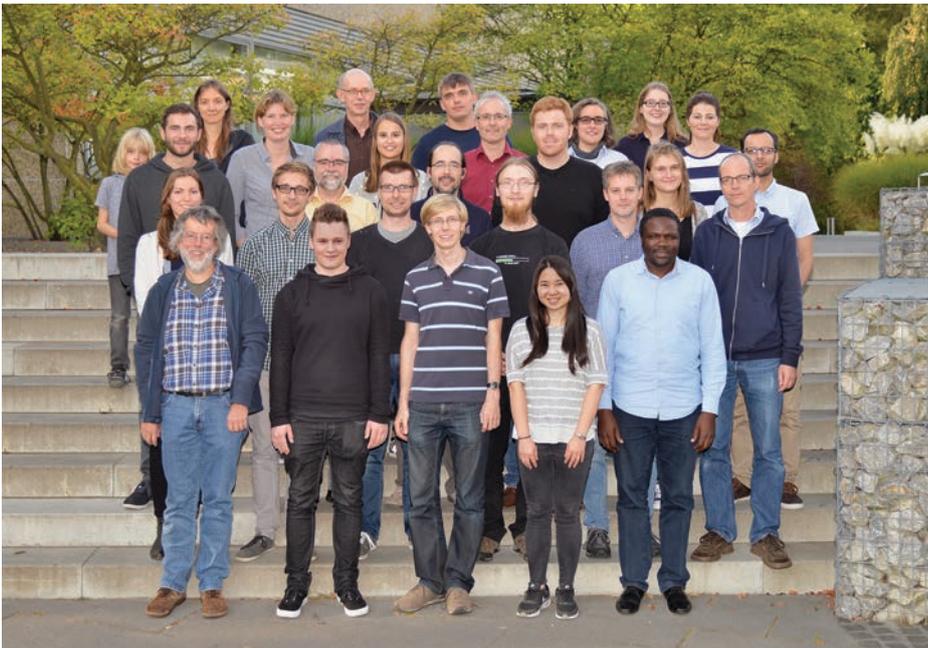
Der MetroSommer 2016 war für alle Seiten ein voller Erfolg: So konnten die Studierenden den PTB-

ans of nanopores in which customized, folded DNA molecules play a critical role. The prize awarding ceremony took place at PTB within the scope of an international symposium attended by metrology experts from around the world.

### **MetroSommer 2016**

The first PTB *MetroSommer* (MetroSummer) was held from 1 August to 30 September 2016 under the motto of “Your most accurate summer!” For this voluntary internship that was offered by PTB, over 30 university students from throughout Germany (who work in STEM fields) entered applications; of these applicants, 14 were ultimately selected to put their knowledge to the test in their own projects. Together with experienced scientists as their mentors, these young junior scientists had the opportunity to trap atoms, characterize magnetic nanostructures, generate and measure high-frequency signals, and work with ultra-stable lasers (among other things) over nine weeks at PTB’s Braunschweig site. They also had the opportunity to participate in a wide variety of projects in PTB’s Technical Cooperation department, from fundamental research to the transfer of quality infrastructure to other countries.

*MetroSommer 2016* was a resounding success for all concerned: For example, the students were able to provide PTB scientists with important measurement data for ongoing research projects while also gathering their first up-close, hands-on research experience outside their universities. Some of the participants even gained additional perspectives about fields of specialization, degree theses and what to do



Die MetroSommer-Studenten und ihre Betreuer in der PTB

“MetroSommer” students and their advisors at PTB

Kollegen beispielsweise wichtige Messdaten für laufende Forschungsvorhaben liefern und dabei im Gegenzug hautnah erste praxisnahe außeruniversitäre Forschungserfahrungen sammeln. Für einige der Teilnehmerinnen und Teilnehmer eröffneten sich sogar weitere Perspektiven im Hinblick auf Spezialisierungsrichtungen, Abschlussarbeiten oder die Zeit nach dem Studium. Dem positiven Feedback aller Teilnehmenden und dem daraus resultierenden allgemeinen Wunsch auf eine Wiederholung im kommenden Jahr wird die PTB gerne nachkommen: Der MetroSommer 2017 ist bereits in Planung.

### FamilienServiceBüro der PTB

Nach der erfolgreichen Zertifizierung der PTB als familienfreundliche Arbeitgeberin im Mai 2015 wurde nun das bereits angekündigte FamilienServiceBüro eröffnet.

Das FamilienServiceBüro bietet den Beschäftigten ein individuelles Beratungs- und Dienstleistungsangebot zum Themenschwerpunkt Vereinbarkeit von Beruf und Familie. Neben individuellen Unterstützungsangeboten rund um die Elternschaft wird auch ein besonderes Augenmerk auf Vereinbarkeitslösungen für pflegende Angehörige gelegt. Das Beratungsspektrum umfasst hierbei sowohl die PTB-eigenen Angebote als auch weitergehende Informationen und Kontakte zu hilfreichen Einrichtungen. Ergänzend werden externe Referenten eingeladen, die auf Informationsveranstaltungen zu aktuellen Themen Auskunft geben.

Alle Informationen und aktuellen Angebote sind auch auf der Intranetseite des Familienservicebüros dargestellt.

following graduation. PTB will be pleased to accommodate the positive feedback of all the participants, including the general request to have the session repeated the following year: *MetroSommer 2017* is already in the works!

### PTB Family Service Office

After being successfully certified as a family-friendly employer in May of 2015, PTB has now opened its Family Service Office (FamilienServiceBüro) as previously announced.

The Family Service Office provides PTB employees with a customized range of services and consulting on making work and family life compatible. In addition to providing customized support services on parenting, the office devotes special attention to compatibility solutions for informal caregivers. This range of consulting includes PTB's own services as well as additional information (including contact information) on useful institutions. To complement this, external consultants are invited to present information on current subjects at events designed for this purpose.

All information and current offers are also available on the intranet page of the Family Service Office.

## Anerkennung und Bewertung des QM-Systems

Das auf seine Kernleistungen im Bereich Kalibrieren, Messen, Prüfen sowie metrologische Forschung und Entwicklung ausgerichtete technische Qualitätsmanagement (QM) der PTB fand erneut seine uneingeschränkte nationale und internationale Anerkennung. Basis bildeten dabei in Ergänzung zu den in den Bundesoberbehörden geltenden gesetzlichen Regelungen die Anforderungen der ISO/IEC 17 025, die Empfehlungen der DFG zur guten wissenschaftlichen Praxis, im Bereich der Chemie zusätzlich der ISO Guide 34 sowie für die Tätigkeit als Konformitätsbewertungsstelle die ISO/IEC 17 065.

Die auf Grundlage der anerkannten Kompetenznachweise vom Präsidenten der PTB abgegebene Selbsterklärung zum Qualitätsmanagement wurde uneingeschränkt durch die Auftraggeber und Nutzer der Leistungen der PTB akzeptiert. Basis dieser Selbsterklärung ist ein auf den Ergebnissen von internen Audits, von Vergleichsmessungen sowie der Auswertung von Rückmeldungen der Kunden von PTB-Leistungen jährlich durchgeführter Selbstbewertungsprozess.

In Umsetzung internationaler Verträge im Rahmen der Meterkonvention (CIPM-MRA), des gesetzlichen Messwesens (OIML-MAA) und im Bereich des Explosionsschutzes (IEC-Ex-Schemas) überzeugten sich internationale Teams von Fachexperten von der fachkompetenten Arbeit und erklärten ihr Vertrauen in ein funktionstüchtiges QM der PTB. Im Rahmen des 2015 eingeführten gegenseitigen Bewertungsverfahrens zwischen den nationalen Metrologieinstituten Österreichs, der Schweiz und Deutschlands wurde die Kompetenz der PTB-Konformitätsbewertungsstelle auf Basis des QM-Systems nach ISO/IEC 17 065 entsprechend der europäischen Richtlinie über nicht-selbsttätige Waagen (NAWID, 2014/31/EU) und der Europäischen Messgeräte-Richtlinie (MID, 2014/32/EU) erneut bestätigt. Das entsprechende Renotifizierungsverfahren wurde durch die EU-Kommission abgeschlossen.

## Kalibrier-, Mess- und Prüfmöglichkeiten

Die messtechnische Rückführung der Bezugsnormale der akkreditierten Konformitätsbewertungsstellen sowie der Eichbehörden auf die nationalen Normale ist als zentrale Aufgabe in der Qualitätspolitik der PTB im Sinne der Darstellung und Weitergabe der SI-Einheiten entsprechend der Beauftragung der PTB durch das Einheiten- und Zeitgesetz sowie durch das Mess- und Eichgesetz verankert. Zur Sicherung der Einheitlichkeit des Messwesens hat die PTB im Rahmen des QM-Systems aktuell 245 nationale Normale definiert.

## Recognition and assessment of the QM system

Once again, PTB's technical quality management (QM) – which is geared towards its core services in the field of calibration, measurement, testing as well as metrological research and development – has gained unlimited national and international recognition. The basis for this was provided by the legal regulations valid in the higher federal authorities; the ISO/IEC 17 025 requirements; the recommendations of the DFG for good scientific practice and – in the field of chemistry – in addition, ISO Guide 34; as well as – for the activity as a conformity assessment body – ISO/IEC 17 065.

The self-declaration on quality management, provided by the President of PTB on the basis of the recognized demonstration of competence, has been accepted without any restrictions by the customers and the users of PTB's services. This self-declaration is based on an annual self-assessment process carried out within the scope of the results of internal audits, comparison measurements as well as the evaluation of feedback from customers of PTB's services.

Within the scope of the implementation of international arrangements in the framework of the Metre Convention (CIPM-MRA), of legal metrology (OIML-MAA), and in the field of explosion protection (IEC-Ex System), international teams of experts examined the expert work done at PTB and declared their confidence in the efficiency of PTB's quality management system. Within the scope of the mutual evaluation procedure introduced in 2015 between the national metrology institutes of Austria, Switzerland and Germany, the competence of PTB's Conformity Assessment Body was re-confirmed on the basis of the QM system according to ISO/IEC 17 065 and in accordance with the European Directive on non-automatic weighing instruments (NAWID, 2014/31/EU) and the European Measuring Instruments Directive (MID, 2014/32/EU). The relevant renotification process was completed by the European Commission.

## Calibration, measurement and testing capabilities

The central task in PTB's quality policy is to provide the metrological traceability of the reference standards of the accredited conformity assessment bodies and of the verification authorities to the national standards. This implies the realization and dissemination of the SI units – a task that has been entrusted to PTB both by the Units and Time Act and by the Measures and Verification Act. To safeguard the uniformity of metrology, PTB has currently defined 245

Zu mehr als 90 % handelt es sich dabei um Primärnormale. Im Rahmen des 1999 abgeschlossenen multilateralen Abkommens des Internationalen Komitees für Maß und Gewicht zur gegenseitigen Anerkennung der nationalen Normale und der entsprechenden Ergebnisberichte (CIPM-MRA) verfügt die PTB über mehr als 1100 anerkannte Kalibrier- und Messmöglichkeiten. Diese Kalibrier- und Messmöglichkeiten bilden die Grundlage für Leistungen der PTB in rund 120 Prüfgebieten. Zur Absicherung der messtechnischen Vergleichbarkeit ist sie im Rahmen des CIPM-MRA an rund 150 Vergleichsmessungen bzw. Pilotstudien beteiligt. Dabei stellt sie zu 30 % das Pilotlabor.

Die national und international nachgefragten Kalibrier-, Mess- und Prüfmöglichkeiten der PTB waren Basis von rund 9000 im Berichtszeitraum ausgestellten Ergebnisberichten. Zur Unterstützung der Eichbehörden, der akkreditierten Konformitätsbewertungsstellen und der nationalen Metrologieinstitute fördert die PTB die Anerkennung und Weiterentwicklung der Kalibrier- und Messmöglichkeiten im Sinne der messtechnischen Rückführung durch Bereitstellung qualifizierter Fachexpertise im Rahmen von Begutachtungs- und Bewertungsverfahren. So waren Fachexperten der PTB in diesem Zusammenhang an über 300 nationalen und internationalen Verfahren beteiligt.

### Revision der ISO/IEC 17 025

Seit Beginn des Jahres 2015 wird die Norm ISO/IEC 17 025 „Allgemeine Anforderungen an die Kompetenz von Prüf- und Kalibrierlaboratorien“ einer tiefgehenden Überarbeitung unterzogen. Innerhalb der PTB wurde dazu eine abgestimmte Position erarbeitet, die auf nationaler Normungsebene in den DIN-Arbeitsausschuss „Zertifizierungsgrundlagen (Grundlagen zur Konformitätsbewertung)“ und dessen Unterausschuss „Laboratorien“ eingebracht wurde. Der Schwerpunkt lag dabei auf der Festlegung vergleichbarer Anforderungen an die metrologische Rückführung für Kalibrier- und Prüflaboratorien unter Berücksichtigung des gesetzlichen Auftrages der PTB im Rahmen des Einheiten- und Zeitgesetzes. In diesem Zusammenhang entstand ein informativer Anhang der Norm, in der neben der tragenden Rolle der nationalen Metrologieinstitute auch die Bedeutung des CIPM-MRA im Rahmen der Meterkonvention beschrieben wird. Zum Jahresende wird der DIS ISO/IEC (Draft International Standard) auf internationaler Ebene zur Abstimmung gestellt. Dann wird auch eine erste deutsche Fassung der revidierten Norm vorliegen. Auf internationaler Ebene ist die PTB in der entsprechenden ISO/CASCO-Arbeitsgruppe über die Internationale Organisation für das gesetzliche Messwesen (OIML) vertreten.

national standards within the scope of the QM system. More than 90 % of them are primary standards. As part of the multilateral agreement of the International Committee for Weights and Measures on the mutual recognition of the national standards and the corresponding result reports (CIPM-MRA) which was concluded in 1999, PTB has more than 1100 recognized calibration and measurement capabilities at its disposal. These calibration and measurement capabilities form the basis for PTB's services in approximately 120 test fields. To ensure the metrological comparability of these services, PTB is currently participating in approximately 150 ongoing comparison measurements and pilot studies. In about 30 % of the comparisons, PTB is the pilot laboratory.

PTB's nationally and internationally requested calibration, measurement and test capabilities formed the basis of approximately 9000 result reports issued in the period under report. To support the verification authorities, the accredited conformity assessment bodies and the national metrology institutes, PTB promotes the recognition and the further development of the calibration and measurement capabilities in the sense of metrological traceability by supplying qualified specialized expertise within the scope of assessment and evaluation procedures. PTB experts participated, for example, in more than 300 national and international procedures in this regard.

### Revision of DIN EN ISO/IEC 17 025

Since the beginning of 2015, the ISO/IEC 17 025 standard “General requirements for the competence of testing and calibration laboratories” has been undergoing comprehensive revision. Inside PTB, a harmonized position was elaborated which was incorporated – at a national standardization level – into the DIN Working Committee “Certification bases (bases on conformity assessment)” and its subcommittee “Laboratories”. Here, the focal task was to determine comparable requirements made on the metrological traceability for calibration and test laboratories, taking into account PTB's legal mandate within the scope of the Units and Time Act. In this context, an informative annex to the standard was drawn up which – besides the leading role of the national metrology institutes – also describes the importance of the CIPM-MRA as part of the Metre Convention. At the end of the year, the DIS (Draft International Standard) ISO/IEC will be put to the vote at the international level. An initial German edition of the revised standard will also be available by that time. At the international level, PTB is represented in the respective ISO/CASCO working group via the International Organization of Legal Metrology (OIML).

## Gesetzliches Messwesen 2016

Das neue Mess- und Eichrecht ist seit über zwei Jahren in Kraft und ist aus Sicht der PTB von allen Beteiligten erfolgreich umgesetzt worden. Das bestehende hohe Schutzniveau des deutschen Messwesens wurde beibehalten. Durch die Einrichtung des Regelermittlungsausschusses wurden die betroffenen Kreise noch stärker eingebunden. Regeln und technische Spezifikationen für national geregelte Messgeräte sowie Regeln und Erkenntnisse über Verfahren der Konformitätsbewertung ermittelt der mit dem Mess- und Eichgesetz eingeführte Regelermittlungsausschuss. Darüber hinaus ermittelt dieser Ausschuss auch Regeln und Erkenntnisse, um die Pflichten von Personen näher zu bestimmen, die Messgeräte oder Messwerte verwenden. Mittlerweile hat der Regelermittlungsausschuss für 95 % der gesetzlich geregelten Messgeräte Regeln unter Beteiligung aller interessierten Kreise ermittelt. Der Regelermittlungsausschuss ist unter [www.rea.ptb.de](http://www.rea.ptb.de) im Internet erreichbar.

Ein Thema, mit dem sich der Regelermittlungsausschuss aus aktuellem Anlass befasst hat, sind Messgeräte im Bereich der E-Mobilität. So gab es am 31. August 2016 eine öffentliche Anhörung des Regelermittlungsausschusses zum Thema „Messgeräte im Anwendungsbereich der E-Mobilität“, die auf große Resonanz bei den betroffenen Kreisen stieß. Etwa 90 Vertreter unter anderem von Herstellern und Verwendern von Ladesäulen, Netzbetreibern, Stromversorgern, Automobilherstellern, Verbraucherschützern, Konformitätsbewertungsstellen, staatlich anerkannten Prüfstellen und Behörden äußerten sich zu zahlreichen Fragen aus dem Mess- und Eichrecht, die wichtig für die Herstellung und Verwendung von Ladesäulen sind. So ging es zum Beispiel darum, welche Messgrößen für die Abrechnung relevant sind, wie diese Messwerte dem Nutzer der Ladesäule angezeigt werden sollen und wie diese Daten, wenn notwendig, zur Sicherheit gespeichert werden sollen.

Seit Einführung des neuen Mess- und Eichrechts werden Konformitätsbewertungen für die mehr als 150 Messgeräteearten entsprechend den Anforderungen des neuen Rechts von der Konformitätsbewertungsstelle der PTB angeboten. Zum 21. April 2016 traten die europäischen Richtlinien für Messgeräte und nichtselbsttätige Waagen in Kraft. Hierfür mussten sich alle europäischen Konformitätsbewertungsstellen, die Konformitätsbewertungen für diese Messgeräte anbieten, neu notifizieren lassen. Die Konformitätsbewertungsstelle der PTB, die für

## Legal metrology 2016

The new Measures and Verification Act has now been in force for more than two years and – from PTB's point of view – has been successfully implemented by all participants. The existing high level of protection of German metrology has been maintained. By setting up a Rule Determination Committee (Regelermittlungsausschuss), the circles involved have been integrated even more intensely. This committee, which was introduced within the scope of the Measures and Verification Act, determines rules and technical specifications for nationally regulated measuring instruments, as well as rules and findings on conformity assessment procedures. In addition, the committee determines rules and findings that define more specifically the duties of persons who use measuring instruments or measurement values. To date, the Rule Determination Committee – with the participation of all interested parties – has determined rules for 95 % of the legally regulated measuring instruments. More information on the Rule Determination Committee is available at [www.rea.ptb.de](http://www.rea.ptb.de).

A subject the committee has addressed in the light of recent developments concerns measuring instruments in the field of e-mobility. To this end, a public consultation by the Rule Determination Committee took place on 31 August 2016 on the subject of “measuring instruments within the e-mobility field of application”; this consultation was met with positive feedback from the circles involved. The 90-odd representatives of industrial firms, among them manufacturers and users of charging stations, network operators, electricity suppliers, automotive manufacturers, consumer protection agencies, conformity assessment bodies, state-approved test centers and governmental authorities, commented on numerous issues surrounding the Measures and Verification Act that are important for the manufacturing and use of charging stations. For example, the attendees asked which measurands are relevant for invoicing, how these measurement values should be indicated to the user of the charging station and how this data should be stored for safety reasons, if necessary.

Since the new Measures and Verification Act was introduced, PTB's Conformity Assessment Body has offered conformity assessments for more than 150 measuring instrument types as required by the new legislation. On 21 April 2016, the European Directives for measuring instruments and non-automatic weighing instruments entered into force. To fulfill

alle in Deutschland und Europa gesetzlich geregelten Messgeräte und Zusatzeinrichtungen Konformitätsbewertungen durchführt, ist als erste von allen europäischen Konformitätsbewertungsstellen renotifiziert worden.

Die Vollversammlung für das Mess- und Eichwesen wurde durch Einführung des neuen Rechts modernisiert und ist jetzt eine Plattform für den Informations- und Erfahrungsaustausch für alle Akteure: neben der PTB, die Eichbehörden, Prüfstellen, Konformitätsbewertungsstellen sowie sachverständigen Institutionen und Verbände (Hersteller, Verwender, Verbraucherschutz).

Die internationale Organisation für das gesetzliche Messwesen (OIML) beschloss im Oktober 2016 die Einführung eines neuen Zertifizierungssystems. Das neue OIML certification system (OIML-CS) soll ab dem Jahr 2018 das aktuelle Zertifizierungssystem, bestehend aus Basic- und MAA-Zertifikaten, ablösen und in ein einheitliches Zertifizierungssystem überführen.

these directives, all European conformity assessment bodies offering conformity assessments for these measuring instruments were required to re-notify themselves. PTB's Conformity Assessment Body, which carries out conformity assessments for all legally regulated measuring instruments and peripheral devices in Germany and Europe, was re-notified as the first of all European conformity assessment bodies.

The General Assembly on Metrology and Verification was modernized by the introduction of the new Act and is now a platform for the exchange of information and experience of all stakeholders – besides PTB, the verification authorities, test centers, conformity assessment bodies and the expert institutions and associations (manufacturers, users, consumer protection).

In October 2016, the International Organization of Legal Metrology (OIML) passed a resolution to introduce a new certification system. Beginning in 2018, the new OIML certification system (OIML-CS) will replace the current certification system (consisting of Basic and MAA certificates) and lead to a uniform certification system.

---

### Kleinstromverstärker für Kalibrierpraxis und Qualitätssicherung

Kleinste elektrische Stromstärken bis hinab in den Femtoampere-Bereich ( $10^{-15}$  Ampere) zu erzeugen und zu messen, ist von zunehmender Bedeutung, etwa für die Entwicklung und Produktionsüberwachung von hochintegrierten Schaltkreisen, für die Dosimetrie im Strahlenschutz, für den Nachweis kleinster Stoffmengen in der Umweltmesstechnik, für biotechnologische Anwendungen wie Sensoren für DNA-Sequenzierer sowie für die Messung von Fotoströmen in der Leuchtmittelindustrie. Um die erforderliche Mess- und Kalibriertechnik zukünftig bereitzustellen, werden in der PTB und weltweit „Einzelelektronen-Schaltkreise“ entwickelt. Diese Systeme dienen der Rückführung der Einheit der elektrischen Stromstärke auf die Elementarladung des Elektrons, indem einzelne Elektronen „gezählt“ werden. Sie müssen allerdings im Millikelvin-Bereich betrieben werden.

In der PTB wurde ein auf einem anderen Prinzip beruhendes handliches Table-Top-Gerät entwickelt, das für den Einsatz in Kalibrierlaboratorien bei Zimmertemperatur geeignet ist. Mit dem Gerät

### Low-current amplifier for practical calibration and for quality assurance

Generating and measuring extremely small electric currents down into the range of femtoamperes ( $10^{-15}$  ampere) are gaining in importance. Developing and monitoring the production of highly integrated circuits, dosimetry in radiation protection, the detection of ultra-low concentrations in environmental measuring techniques, DNA sequencers and the measurement of photoelectric currents in the lighting industry are examples of this. In order to provide the required measurement and calibration technology in the future, “single-electron circuits” are being developed both at PTB and worldwide. These systems are used to link up the unit of electric current to the elementary charge of an electron by “counting” single electrons. Such systems must, however, be operated in the millikelvin range.

At PTB, a handy, table-top device which is based on a different principle has been developed. It is designed for operation at room temperature in calibration laboratories. With this device, it is possible to attain nearly the same accuracy as with a single-electron source. With regard to its characteristics, it



### Strategische Partnerschaften für nachhaltige Energie

Das Jahr 2016 stand für die Technische Zusammenarbeit im Zeichen strategischer Partnerschaften, deren Ausbau speziell im Bereich nachhaltiger Energie aktiv vorangetrieben wurde. Sichtbarer Ausdruck dieses Bestrebens waren zwei prominent besetzte Veranstaltungen in Kooperation mit der *Asian Development Bank* (ADB) und der *International Electrotechnical Commission* (IEC). Beide Akteure verbindet ihre komplementäre entwicklungspolitische Relevanz: Die ADB zählt zu den weltweit größten Finanzierungsorganisationen für Energieprojekte in Entwicklungs- und Schwellenländern. IEC verfügt mit dem *Affiliate Country Programme* über ein wirkungsvolles Instrument zur Integration von Entwicklungsländern in die internationale Normungsarbeit. Zudem stärkte die PTB die Zusammenarbeit mit der *International Renewable Energy Agency* (IRENA), die sich seit ihrer Gründung 2009 verstärkt dem Thema Qualitätsinfrastruktur öffnet.

Die Veranstaltung mit der ADB fand im Rahmen der 49. Jahrestagung der Entwicklungsbank statt, die dem Motto „Cooperating for Sustainability“ folgte und Anfang Mai 2016 erstmals von Deutschland ausgerichtet wurde. Das auf Anregung des Parlamentarischen Staatssekretärs im Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (BMZ) von der PTB konzipierte und organisierte Fachseminar widmete sich qualitätsbezogenen Herausforderungen beim Aufbau erneuerbarer Energiesysteme. Das Panel, dem neben dem Präsidenten der PTB auch Projektpartner aus Indien und Indonesien sowie Vertreter von IRENA und der KfW Entwicklungsbank ange-

### Strategic partnerships for sustainable energy

For the Technical Cooperation Department, 2016 was characterized by strategic partnerships, whose development was actively advanced especially in the field of sustainable energy. This effort was visibly expressed by two prominently attended events in cooperation with the Asian Development Bank (ADB) and the International Electrotechnical Commission (IEC). Both players are connected by the relevance of their complementary development policies: ADB is one of the world's largest financing organizations for energy projects in developing and emerging economies. With its "Affiliate Country Programme", the IEC has an effective instrument for integrating developing countries into international work on standardization. PTB, furthermore, strengthened its collaboration with the International Renewable Energy Agency (IRENA), which has increasingly given more attention to quality infrastructure since its foundation in 2009.

The event with ADB took place within the scope of the 49th annual meeting of the development bank, which focused on the theme of "Cooperating for Sustainability" and was held in Germany for the first time at the start of May 2016. A seminar which was based on an idea by the Parliamentary State Secretary of the Federal Ministry for Economic Cooperation and Development (*Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung - BMZ*), Hans-Joachim Fuchtel, and was planned and organized by PTB, was dedicated to quality-related challenges in the development of renewable energy systems. The panel of speakers, which comprised project partners from India and Indonesia as well as the President of PTB along with representatives of IRENA and the KfW development

ADB-Vizepräsident Bambang Susantono vor Beginn der Podiumsdiskussion

ADB Vice-President Bambang Susantono before the start of the podium discussion



hörten, wies hierbei u. a. auf Rentabilitäts- und Reputationsverluste infolge vernachlässigter Qualitäts- und Sicherheitsaspekte hin. Finanzierungsprogramme zum Ausbau erneuerbarer Energien müssten Hand in Hand gehen mit dem Kapazitätsaufbau in der Qualitätsinfrastruktur, so die einhellige Schlussfolgerung.

Im Oktober war die PTB Gastgeber eines weiteren internationalen Fachseminars zum Thema Qualitätsinfrastruktur und erneuerbare Energien. Den Hintergrund bildete diesmal die 80. IEC-Jahrestagung in Frankfurt, die von der Deutschen Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik (DKE) ausgerichtet wurde. Im gemeinsam mit DKE und IEC gestalteten *Workshop for Industrialising Countries* wurden Beispiele und Lernerfahrungen zum Thema „Quality Infrastructure and Renewable Energies: Sharing Expertise for capacity development“ ausgetauscht. Anschließende Laborbesuche vermittelten den 120 Vertretern der internationalen Normungswelt praktische Einblicke in energiebezogene Forschungsfelder der PTB. Den Abschluss bildete ein Abstecher nach Jühnde, das erste Bioenergiedorf in Deutschland, um die Machbarkeit dezentraler, auf erneuerbaren Energien basierender Energiekonzepte zu vermitteln.

Mit IRENA gab es bereits in der Vergangenheit zahlreiche Anknüpfungspunkte auf Projektebene. So wurden gemeinsame Workshops veranstaltet und die Erstellung von Publikationen fachlich unterstützt. Angesichts der wachsenden Bedeutung, die der Schnittstelle von Qualitätsinfrastruktur und erneuerbaren Energien zukommt, erschien es für die PTB und IRENA naheliegend, die Zusammenarbeit zu intensivieren. Dies erfolgt in Form einer Vereinbarung mit dem in Bonn ansässigen *IRENA Innovation and Technology Centre* (IITC) zur Stärkung der personellen Zusammenarbeit. So wurde dem IITC im Oktober für zwei Monate ein Mitarbeiter der Technischen Zusammenarbeit mit dem Ziel, den gegenseitigen Austausch von Wissen und Informationen zu stärken, zur Verfügung gestellt. Weitere Personalzuweisungen sind für 2017 geplant.

Internationale Partnerschaften sowie die PTB-interne Kooperation zwischen Technischer Zusammenarbeit und den Fachabteilungen werden auch in Zukunft die Grundlage erfolgreicher Entwicklungsvorhaben bilden. Der Fachbereich Technische Zusammenarbeit möchte sich an dieser Stelle bei seinen Partnern und den Kollegen und Kolleginnen in der PTB für die ausgezeichnete Unterstützung und Zusammenarbeit bedanken.

bank, pointed to a number of issues including the loss of profitability and reputation as a result of neglected quality and security issues. Financing programs for the development of renewable energies must go hand in hand with the development of capacity in quality infrastructure. This was the unanimous conclusion.

In October, PTB hosted another international seminar on quality infrastructure and renewable energies. This time the background was provided by the IEC 80th General Meeting in Frankfurt, which was organized by the German Commission for Electrical, Electronic & Information Technologies of DIN and VDE (*Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik – DKE*). In the “Workshop for Industrialising Countries”, which was jointly organized with the DKE and the IEC, examples and experience gained on “Quality Infrastructure and Renewable Energies: Sharing Expertise for Capacity Development” were exchanged. The laboratory visits that followed gave the 120 participants from the international world of standardization practical insights into the fields of research which relate to energy at PTB. The event was rounded off with a trip to Jühnde, the first village to produce heat and electricity by means of renewable biomass in Germany. This showed the workshop participants the feasibility of decentral energy concepts based on renewable energies.

IRENA has had numerous links with PTB at project level in the past. For instance, joint workshops have been held and the production of publications has been supported with PTB’s expertise. In view of the growing importance that is attached to the interface between quality infrastructure and renewable energies, it seems natural for PTB and IRENA to intensify their cooperation. This is taking place in the form of an agreement with the IRENA Innovation and Technology Centre (IITC) based in Bonn, and is to strengthen collaboration between members of staff. One of the Technical Cooperation Department’s employees was thus seconded to the IITC in October for two months with the aim of strengthening the mutual exchange of knowledge and information. More temporary staff assignments are planned for 2017.

International partnerships as well as PTB-internal collaborations between the Technical Cooperation Department and PTB’s technical divisions will form the basis of successful development projects also in the future. The Technical Cooperation Department would like to take this opportunity to thank its partners and colleagues at PTB for their outstanding support and cooperation.

### Das neue Internationale System der Einheiten (SI)

Das Internationale Einheitensystem (SI) steht vor einer grundlegenden Revision. In Zukunft wird man die Werte einiger ausgewählter Naturkonstanten festlegen und daraus dann die Einheiten ableiten. Für den Meter und die Sekunde ist dies bereits heute – mit der Lichtgeschwindigkeit und einer speziellen Frequenz im Cäsiumatom – der Fall. Für diese beiden Einheiten ändert sich nichts Grundsätzliches. Anders dagegen für Kilogramm und Mol, Ampere und Kelvin. Hier sind die Änderungen fundamental. Die Naturkonstanten, die bei diesen Einheiten eine große Rolle spielen werden, sind das Planck'sche Wirkungsquantum, die Avogadro-Konstante, die Elementarladung und die Boltzmann-Konstante.

Die metrologischen Hintergründe und Konsequenzen aus dieser Revision des Einheitensystems sind das eine. Die Vermittlung dieser Neuerung in die unterschiedlichsten Fachöffentlichkeiten hinein, in die Schulen und Hochschulen sowie für die allgemeine Öffentlichkeit ist das andere. Gerade diesen Vermittlungsaspekt nimmt die PTB sehr ernst und hat mehrere Publikationen für die unterschiedlichen Zielgruppen veröffentlicht und mehrere Veranstaltungsformate zu diesem komplexen Thema entwickelt. Die Publikationen können von der Webseite <http://www.ptb.de/cms/forschung-entwicklung/forschung-zum-neuen-si.html> heruntergeladen oder bei der Presse- und Öffentlichkeitsarbeit bestellt werden. Auf dieser Webseite sind zugleich alle verfügbaren PTB-Informationen rund um das neue SI versammelt.

### The new International System of Units (SI)

The International System of Units (SI) is about to undergo a fundamental revision. In the future, the values of certain selected fundamental constants will be set; the units will then be derived from these values. For two units, this has already taken place: the meter is defined via the speed of light and the second via a special frequency in the cesium atom. Neither of these two units will go through any essential changes. Quite the opposite, though, is true of the kilogram, the mole, the ampere and the kelvin: their changes will be fundamental in nature. The fundamental constants that are relevant for these units are Planck's constant, the Avogadro constant, elementary charge and the Boltzmann constant.

The metrological background factors and implications from this revision of the SI form one element. Providing information on this reform to the broadest possible spectrum of experts, to schools and universities, and to the general public forms another element. It is this dissemination of information that PTB takes very seriously, developing a range of publications for its different target groups and several event formats for this complex subject. These publications can be downloaded from <http://www.ptb.de/cms/en/research-development/research-on-the-new-si.html> or ordered from the Press and Information Office. This website also contains all available PTB info sheets in all matters related to the new SI.

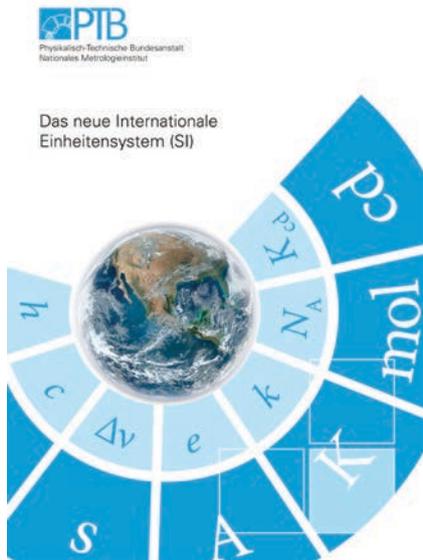


### Fachjournal PTB-Mitteilungen

Bevor die Neudefinitionen des Einheitensystems tatsächlich auf der Generalkonferenz der Meterkonvention im November 2018 verabschiedet werden können, müssen die Experimente zur Bestimmung der Naturkonstanten in den metrologischen Laboratorien erfolgreich abgeschlossen werden. Die Ausgabe 2.2016 der PTB-Mitteilungen beschreibt diese Experimente, ohne zu tief in die wissenschaftlichen Details zu gehen. Die Aufsätze richten sich an Studenten, Lehrer und interessierte Schüler der Physik.

### PTB-Mitteilungen technical journal

Before the new definitions of the International System of Units can actually be adopted at the CGPM in November 2018, the experiments on the determination of the fundamental constants have to be successfully completed in the metrological laboratories. Edition 2.2016 of *PTB-Mitteilungen* describes these experiments without going into too much scientific detail. These articles are written with university physics students and teachers in mind, as well as schoolchildren who may be curious about this field.



### Allgemeines Informationsblatt

Das neue SI wird ein Meilenstein der Kulturgeschichte. Was bedeutet das konkret für Schüler, Wissenschaftler, Techniker und die allgemeine Öffentlichkeit? Das PTB-Infoblatt erläutert es knapp und übersichtlich und beantwortet allgemeinverständlich, weshalb die Metrologen überhaupt Hand an die Definitionen der Einheiten legen. Das Infoblatt richtet sich an alle, die überblicksartig wissen wollen, worum es beim neuen SI geht.

### General information sheet

The new SI will be a milestone for civilization itself. What does this mean in concrete terms for schoolchildren, university students, scientists, engineers and the general public? The PTB info sheet provides concise and clear explanations, and answers in layperson's terms why metrologists are changing these definitions in the first place. The info sheet is directed at anyone who would like an overview of what the new SI is all about.

### Vortrag über das neue SI

Der Weg zum neuen SI wird auch in einem PTB-Vortrag („Für alle Zeiten und Kulturen. Das neue internationale System der Einheiten“) anschaulich für ein größeres Publikum beschrieben. Die „Vortragspremiere“ fand im Rahmen der Berlin Science Week statt: Der PTB-Präsident hielt den Vortrag am 2. November 2016 im Institut Berlin der PTB. In adaptierter Form wird dieser Vortrag bei weiteren Gelegenheiten gehalten werden. (Ein Mitschnitt dieses Vortrags ist auf der Webseite der PTB zu finden.)

### Lecture on the new SI

A PTB lecture titled “For all times and all cultures – the new International System of Units” made the path to the new SI accessible to a broader audience. This “lecture premiere” took place within the scope of the Berlin Science Week: PTB's president held the lecture on 2 November 2016 at PTB's Berlin institute. This lecture will be held on other occasions in an altered form. (A recording of this lecture can be found on PTB's website.)



Bundeskonzferenz:



Eine Veranstaltungsreihe des MIT Club of Germany e.V.  
<https://www.schule-mit-wissenschaft.de>

### Lehrer-Workshop

Im neuen Einheitensystem werden die Definitionen, indem sie auf die Werte von Naturkonstanten Bezug nehmen, viel abstrakter sein, als das heute der Fall ist. Diese neuen Zusammenhänge zu vermitteln, stellt eine anspruchsvolle didaktische Aufgabe dar, die noch keineswegs vollständig gelöst ist. Eine mögliche Unterrichtsmethodik (nach einer Idee der Presse- und Öffentlichkeitsarbeit) wurde in einem Lehrer-Workshop erfolgreich vorgestellt. Der Workshop wurde im Rahmen einer Fortbildungs-Veranstaltungsreihe des MIT Club of Germany e. V. in Braunschweig durchgeführt.

### Teacher workshop

The definitions of the new International System of Units will become much more abstract than they currently are by referring to the values of fundamental constants. Disseminating these new relations is a didactic challenge – one that is by no means fully solved. A possible methodology for teaching this material (taken from an idea developed by the Press and Information Office) was successfully presented in a teacher workshop. The workshop was held in Braunschweig within the scope of a series of advanced training events presented by the MIT Club of Germany e.V.



# Akademische Abschlüsse • Academic Degrees

## Promotionen 2016 • Doctorates in 2016

Name	Organisationseinheit Hochschule	Thema
Leonhard Klaus	1.7 U Hannover	Entwicklung eines primären Verfahrens zur Kalibrierung von Drehmomentaufnehmern mit dynamischer Anregung
Philipp Wiese	2.5 U Hannover	Anwendungen von Einzelelektronenpumpen für hochpräzise quantisierte Stromquellen und Schaltungen
Benjamin Kühnreich	3.2 TU Darmstadt	Isotopenaufgelöste in-situ Untersuchung der Wasserfraktionierung in Wolken
Michaela Distelrath (geb. Schuster)	4.1 TU Berlin	Short-pulse Lasers in Photometry and Radiometry
Ines Fortmeier	4.2 U Stuttgart	Zur Optimierung von Auswerteverfahren für Tilted-Wave Interferometer
Sebastian Häfner	4.3 U Hannover	Ultra-stabile Lasersysteme für Weltraum und Boden Anwendungen
Stefan Vogt	4.3 U Hannover	Eine transportable optische Gitteruhr basierend auf Strontium
Ali Al-Masoudi	4.3 U Hannover	A strontium lattice clock with reduced blackbody radiation shift
Jonas Keller	QUEST-2 U Hannover	Spectroscopic characterization of ion motion for an optical clock based on Coulomb crystals
Martina Wahnschaffe	QUEST-3 U Hannover	Engineered microwave control for trapped ions
Christoph Weichert	5.2 TU Braunschweig	Implementierung von Geradheitsmessungen am Nanometerkomparator der PTB
Oliver Kranz	5.2 U Stuttgart	Modellierung und experimentelle Erprobung eines Raumwinkel-Kalibriersystems für zweiachsige Autokollimatoren
Kerstin Rost	5.3 U Bremen	Ermittlung einer aufgabenspezifischen Messunsicherheit für Verzahnungsmessungen – Übertragung des Virtuellen Koordinatenmessgerätes auf Verzahnungsmessgeräte
Torsten Mai	5.4 TU Braunschweig	Aufbau und Simulation des Kugelinterferometers II der PTB
Frank Schmaljohann	5.5 RWTH Aachen	Gesputterte, elektrisch isolierende Schichten für Dünnschichtsensoren auf metallischen Grundkörpern

### Promotionen 2016 • Doctorates in 2016

Name	Organisationseinheit Hochschule	Thema
Alexander Arndt	6.5 U Frankfurt	Untersuchung der Fragmentierungsprozesse biomolekularer Substanzen nach der Wechselwirkung mit ionisierender Strahlung mittels eigens entwickelter Messapparatur und COLTRIMS
Philipp Hönicke	7.2 TU Berlin	Charakterisierung nanoskaliger Schichtstapel durch eine Kombination aus referenzprobenfreier Röntgenspektroskopie unter streifendem Einfall und der Röntgenreflektometrie
Mathias Kehrt	7.3 TU Berlin	Entwicklung, Realisierung und Charakterisierung eines TES-Bolometers für die THz-Metrologie
Albert Adibekyan	7.3 U Wuppertal	High-accuracy Spectral Emissivity Measurement for Industrial and Remote Sensing Applications
Stephan Krenek	7.3 TU Berlin	Dynamische Emissionsgradmessung im Hochtemperaturbereich
Markus Juling	7.5 TU Berlin	Rückgeführte Volumenstrommessung mittels ortsaufgelöster Laser-Doppler-Anemometrie
Tom Rubin	7.5 FU Berlin	Präzise Partialdruckbestimmung bei der Atemgasanalyse und in der Metrologie
Andre Kühne	8.1 U Magdeburg	Parallel Transmission in MRI: Electromagnetic Considerations and Advances in Signal Chain Hardware
Jens Voigt	8.2 TU Ilmenau	Entwicklung eines Messsystems zur Charakterisierung magnetisch geschirmter Umgebungen
Gael Bringout	8.2 U Lübeck	Field Free Line Magnetic Particle Imaging Characterisation and imaging device up-scaling
Peter Simon	8.3 RWTH Aachen	Mikrofluidischen Sensoren in der Durchflusszytometrie zur kombinierten optisch-elektronischen Analyse an Blutzellen

### Habilitationen 2016 • Habilitations in 2016

Name	Organisationseinheit Hochschule	Thema
Tanja Mehlstäubler	QUEST-2 U Hannover	Quantensensoren mit lasergekühlten Atomen und Ionen

**Diplom- und Masterarbeiten 2016 • (Master) Theses in 2016**

Name	Organisationseinheit	Thema
Davood Momeni Pakdehi	2.5	Expitaxial graphene growth on $^4\text{H}$ and $^6\text{H}$ SiC: growth optimization and characterization
Stefanie Moritz	3.5	Bestimmung der Temperatur von Hochspannungskondensatorentladungen geringer Energie mittels optischer Emissionsspektroskopie
Nadja Schwindt	3.5/3.7	Entwurf und Aufbau einer Versuchsanlage zur Bestimmung von elektrostatischen Ladungen auf Kunststoffrohren
Nadine Berger	3.5	Thermische Beurteilung von Schaltegerätekombinationen im Explosionsschutz
Florian Koch	3.5	Quantitative LIF-basierte Untersuchungen an nicht reaktiven transienten Freistrahlen
Corinna Steens	3.5	Untersuchung der Zündwirksamkeit von heißen Freistrahlen
Isabellé Sauer	3.7	Untersuchungen zur Zündquellenentstehung bei Reibkontakten von Bronzelegierungen und deren Zündwirksamkeit in explosionsfähigen Gas-Luft Gemischen
Dominic Roth	3.7	Grundlagen der elektrostatischen Untersuchungen zur Charakterisierung von HGÜ-Isoliersystemen
Tom Schulze-Bubert	4.1	Entwicklung und vorläufige Charakterisierung eines LED-basierten Sonnensimulators
Lars Daul	5.1	Herstellung von selbstorganisierenden Palladium-Clustern auf der Si(111)-Oberfläche als laterales Auflösungsnormal für die Rastersondenmikroskopie
Daniel Grziwotz	5.1	Automatisierung einer Härtenormalmesseinrichtung für das Härteprüfverfahren nach Rockwell
Florian Heimbach	6.5	Energieabhängige Bestimmung der Fragmentierungsquerschnitte gewebeäquivalenter Gase nach ionisierender Wechselwirkung mit Elektronen
Denise Sinning	7.2	Differenzierung und Klassifikation von Leishmanienspezies mittels Fourier-Transform-Infrarotspektroskopie
Patricia Radon	8.2	Aufbau und Inbetriebnahme eines Flussphantoms zur Bestimmung der Targetingeffizienz von magnetischen Nanopartikeln mittels Magnet-Partikel-Spektroskopie

**Bachelorarbeiten 2016 • Bachelor Theses in 2016**

Name	Organisationseinheit	Thema
Christof Pöttsch	1.2	Automatisierung einer 20 N Kraft-Normaleinrichtung
David Ulm	2.2	Untersuchungen zur Messunsicherheit bei der Bestimmung des Richtdiagramms typischer Antennen
Guang Yin	2.3	Entwicklung eines präzisen Spannungs- und Transkonduktanzverstärkers für die Erzeugung von Spannungen bis 300 V und Strömen bis 10 A
Alexander Seidel	2.3	Realisierung einer Schaltung zur Innenwiderstandskompensation eines Strommessgerätes
Fangxin Zhou	2.3	Aufbau eines Messplatzes für Blindleistungskomponenten
Tim Christoph Schlüterbusch	2.3	Softwareentwicklung einer Steuerung für Hochspannungsnetzgeräte und Einbinden einer Thermokamera im Laborumfeld der PTB Braunschweig
Hava Namdar	2.3	Batteriesimulationssystem mit Kommunikationsanbindung an Batteriewechselrichter und Bidirektionalem Netzgerät
Yiyuan Zhang	2.3	Entwicklung und Programmierung einer softwaregestützten aktiven Reduzierung des Klirrfaktors für Strom- und Spannungsverstärker
Sven-Martin Winter	2.4	Bestimmung der Orientierung der {111}-Kristallebenen auf (110)-Siliziumwafern
Sascha Gorny	2.5	Kalibrierverfahren für ein magnetooptisches Streufeldmesgerät
Joshua Kurda	2.5	Aufbau eines Messplatzes zur hochempfindlichen FMR-Charakterisierung dünner magnetischer Schichten im Feldbereich 1 Tesla mit einem interferometrischen Messverfahren
Bin Wang	3.5	Entwicklung eines temperaturgeregelten Controllers für einen verwendeten Prüfgegenstand im Ex-Ringvergleichsprogramm
Henrik Wingerath	QUEST-2	Erzeugung von 230 nm Laserstrahlung zur Detektion von Indium Ionen
Sascha Hilt	5.5	Beschichtung hoher Aspektverhältnisse und Hinterschnitte mittels HiPIMS
Pascal Mathias	6.3	Realisierung einer mehrkanaligen Pulsbreitenmessung mit hoher Zeitauflösung
Björn Reinelt	6.3	Entwicklung eines Softwarepaketes zur Steuerung eines Systems für die Erfassung von Photonenstrahlenspektren und zur Auswertung der Messdaten
Layla Riemann	7.1	Optimierung der Durchflusszelle für SAXS-Messungen zur dimensionellen Charakterisierung von Nanopartikeln
Karl Wiese	7.1	Bestimmung optischer Konstanten von B4C-Schichten im VUV-Spektralbereich durch Reflektometrie

**Bachelorarbeiten 2016 • Bachelor Theses in 2016**

Name	Organisationseinheit	Thema
Jakob Fehmel	7.2	Charakterisierung von SiC-Schichtsystemen mittels Nahfeld-Mikroskopie
Keven Mauersberger	7.2	Chemische Charakterisierung der Oberfläche eines Pfanneneinsatzes eines künstlichen Hüftgelenkes mittels Röntgenspektrometrie mit Synchrotronstrahlung
Tobias Pohl	7.3	Erweiterung eines Detektorvergleichsmessplatzes für den Spektralbereich des mittleren Infrarot
Moritz Feierabend	7.3	Bestimmung des Emissionsgrades des refraktischen Metalls Wolfram bei 400 °C, 600 °C und 800 °C
Hendrik Hetmann	7.5	Untersuchung von gestörten Rohrströmungsprofilen mit numerischer Strömungssimulation bei unsicherer Reynoldszahl
Lara Rockenstein	7.5	Laseroptische und numerische Untersuchung der Strömungszustände im Nachlauf eines Kugelhahns
Joshua Leonhardt	7.5	Automatisierung eines neu entwickelten Kamera-Kalibrierverfahrens für die Particle Image Velocimetry
Florian Peinl	7.5	Verringerung von hydraulischen und mechanischen Störeinflüssen an einem laseroptischen Durchflussprüfstand
Felix Ptach	8.2	Konzeption und Konstruktion einer Probenaufnahme inkl. Analyse der Eignung für unterschiedliche magnetische Messverfahren
Alexander Hoppe	8.3	Messung der räumlich aufgelösten difusen Reflexion an gewebeähnlichen Phantomen

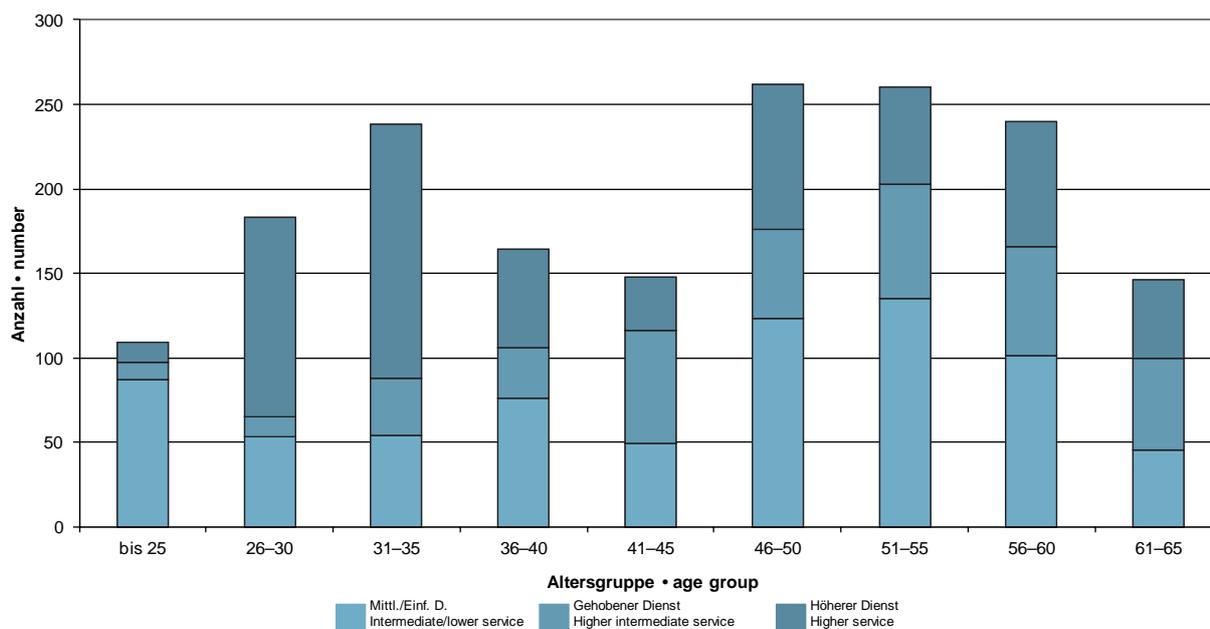
# Zahlen und Fakten • Figures and Facts

## Personal: Entwicklung • Staff: development

Personelle Entwicklung von 2007 bis 2016 (Stand: 31. Dezember 2016) • Development of staff  
 a) unbefristet • unlimited in time b) zeitlich befristet • limited in time

Beschäftigungsverhältnis	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
a)										
Beamte • civil servants	523	517	513	537	535	550	540	533	522	537
Beschäftigte • employees	833	830	831	795	779	752	718	704	725	702
gesamt • total	1356	1347	1344	1332	1314	1302	1258	1237	1247	1239
b)										
Auszubildende • trainees	136	134	135	134	131	135	140	142	141	137
befristet Beschäftigte • temporary staff	98	110	175	230	264	209	234	211	248	314
Drittmittelpersonal • staff members financed by third parties	162	172	185	194	216	286	303	295	319	282
Mitarbeiter gesamt staff members in total	1752	1763	1839	1890	1925	1932	1935	1885	1955	1972

## 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)

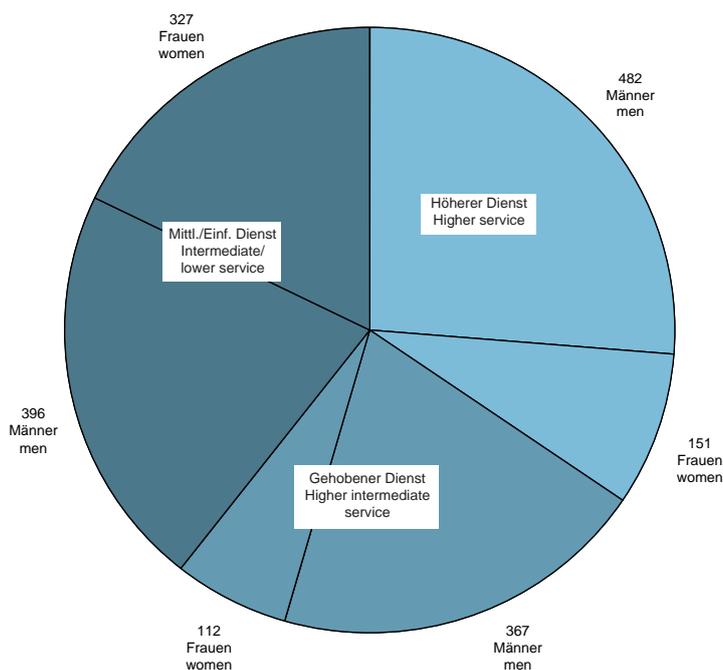
**Ausbildung • Training (31. Dezember 2016)**

	BS	Berlin	
Duales Studium Elektrotechnik im Praxisverbund	15 (4)	--	Dual studies in electrical engineering in a practice union
IT-Systemelektroniker	13 (3)	--	information and telecommunication technologists
Fachinformatiker	7 (4)	--	qualified IT specialist
Elektroniker/in für Geräte und Systeme	31 (9)	--	electronics technicians for devices and systems
Physiklaboranten	17 (6)	--	laboratory technicians, physics
Elektroniker für Energie- und Gebäudetechnik	11 (3)	--	electronics engineers for electrical and building services engineering
Feinwerkmechaniker Fachrichtung Feinmechanik	14 (4)	4 (2)	precision instrument makers speciality: precision mechanics
Fotografen	3 (1)	--	photographers
Mediengestalter	4 (1)	--	media designers
Tischler	--	4 (2)	joiners
Elektroniker/in für Informations- und Systemtechnik	--	7 (1)	electronics technicians for information and systems technology
Verwaltungsfachangestellte	--	3 (0)	public administration employees
Kaufmann/frau für Bürokommunikation	--	4 (2)	office management assistant
gesamt	115 (35)	22 (7)	total

Die PTB gehört zu den größten Ausbildungsbetrieben in der Region Braunschweig. Gegenwärtig sind 137 Auszubildende bei der PTB angestellt. In Klammern sind die Neueinstellungen im Berichtsjahr angegeben.

The PTB is among the most important institutions in the region of Braunschweig which provide training. 137 trainees are at present employed by PTB. The figures in parentheses indicate fresh engagements in the year under review.

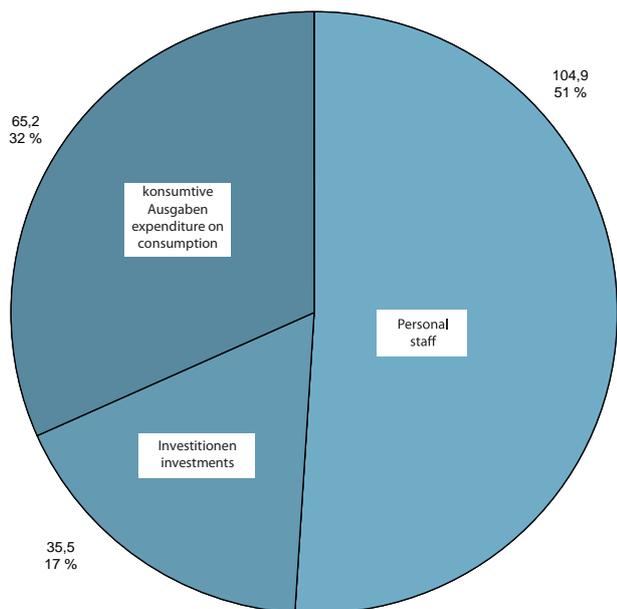
**Personal: Laufbahn • Staff: civil service career**



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

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

Haushalt: Ausgabenverteilung • Budget: break-down of expenditure



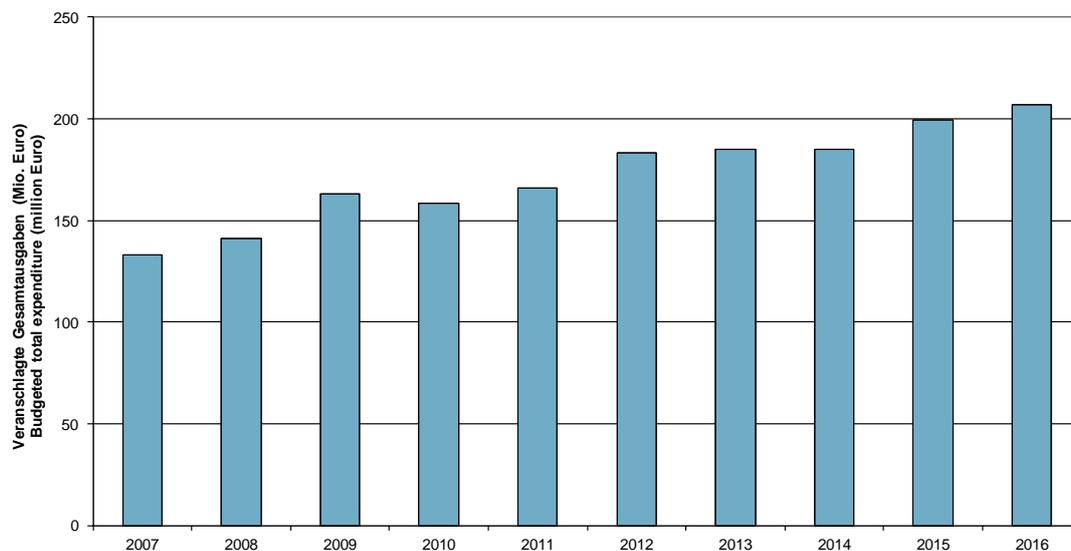
Die Grafik zeigt, wie sich im Berichtsjahr die veranschlagten Ausgaben verteilen (in Mio. Euro). Zum Vergleich nennt die Tabelle die Vergleichszahlen der letzten Jahre.

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

Ausgaben der PTB (in Mio. Euro) • Expenditure of PTB (in million euros)

Haushaltsmittel	2014	2015	2016	budgetary means
Personalausgaben	101,0	103,6	104,9	staff costs
Investitionen (Bau und Geräte)	27,6	33,8	35,5	investments (building activities and instruments)
Zuweisungen und Zuschüsse	1,1	1,2	1,2	allocations and grants
konsumtive Ausgaben	55,8	61,1	65,2	expenditure on consumption
gesamt	185,5	199,7	206,8	total

Haushalt: Entwicklung • Budget: development

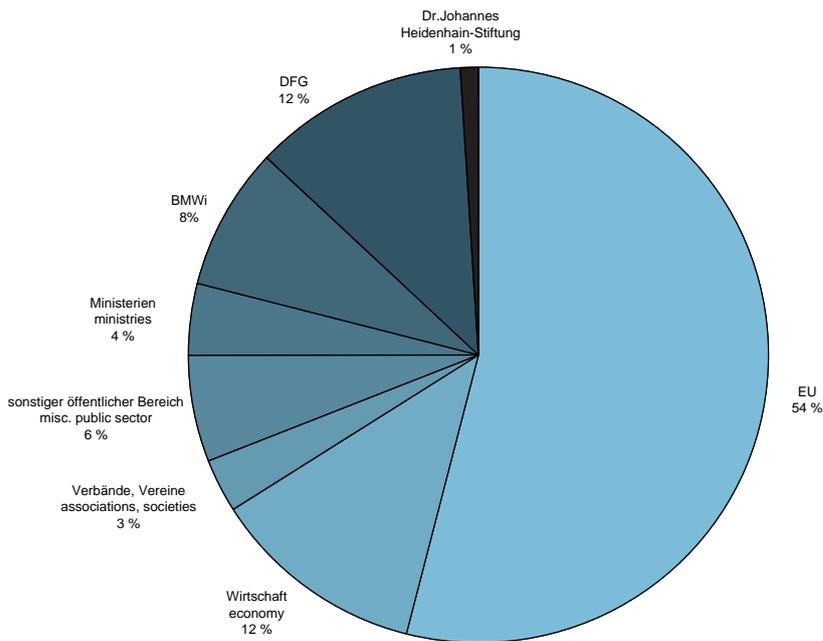


Entwicklung der Gesamtausgaben im PTB-Haushalt in den letzten zehn Jahren  
Development of the total expenditure of the PTB budget in the past ten years

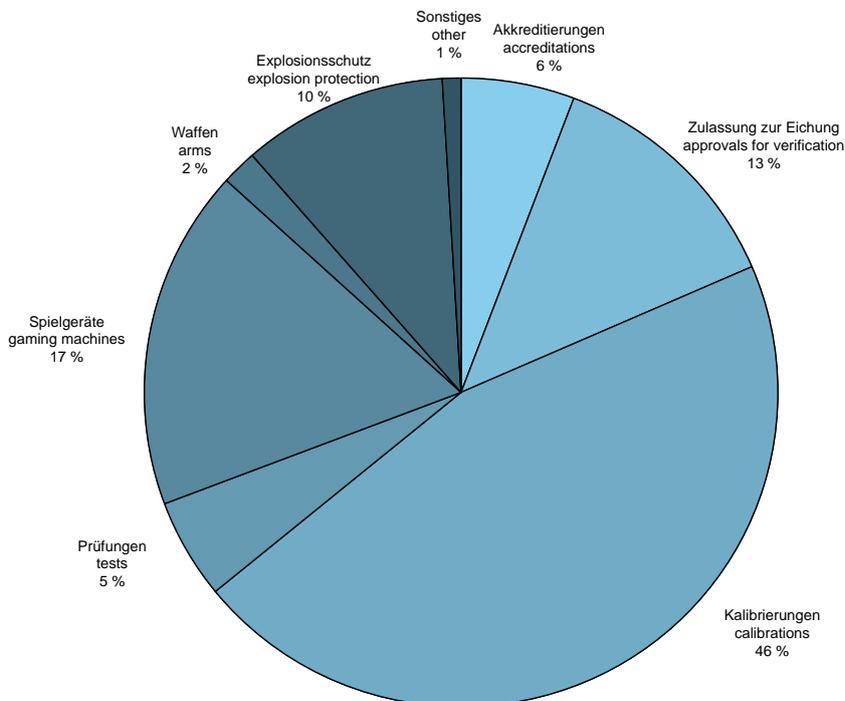
**Drittmittel: Forschungsprojekte • Third-party funds: research projects**

Die Drittmittel für Forschungsvorhaben summieren sich 2016 auf 18,0 Mio. Euro. Die Grafik gibt die prozentualen Anteile der unterschiedlichen Quellen an. Speziell mit den Mitteln der Heidenhain-Stiftung GmbH wird eine Nachwuchsgruppe finanziert. Insgesamt wurden im Berichtsjahr 35,8 Mio. Euro für 648 Drittmittelprojekte (Forschungsvorhaben und Projekte der Technischen Zusammenarbeit) verwendet (davon 2,8 Mio. Euro für 96 Projekte in Berlin).

In 2016, the third-party funds for research projects added up to a total of 18.0 million euros. The chart shows the contributions (in percent) from the different sources. A group of junior researchers receives special funding from the Heidenhain Foundation (Heidenhain-Stiftung GmbH). In the year under review, a total of 35.8 million euros were used for 648 third-party projects (research projects and technical cooperation projects), 2.8 million euros of these for 96 projects in Berlin.



**Einnahmenanteile der Dienstleistungsbereiche • Income shares of the service centers**



Einnahmenanteile der verschiedenen Dienstleistungsbereiche der PTB im Jahr 2016. Gesamtforderungen: 11,10 Millionen Euro

Income distribution of 2016 among the various service sectors of PTB. Total receivables: 11.10 million euros

### Umwelt: Verbrauchszahlen • Environment: consumption figures

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

... in Braunschweig		2014	2015	2016	
Ressourcen:					resources:
elektrische Energie	MWh	27 600	27 600	27 700	electrical energy
Wärme	MWh	21 100	21 600	20 300	heat
Gas	m <sup>3</sup>	26 900	27 100	19 100	gas
Wasser	m <sup>3</sup>	85 600	79 700	117 000	water
Abfälle:					waste produced:
hausmüllähnlich	t	75	90	110	refuse-like
recycelt	t	209	203	205	recycled
zur Beseitigung	t	20	56	61	hazardous
Entsorgungskosten (ca.)	EUR	83 900	110 300	100 200	waste disposal costs (approx.)

... in Berlin		2014	2015	2016	
Ressourcen:					resources:
elektrische Energie	MWh	8500	8540	8380	electrical energy
Gas	m <sup>3</sup>	19 700	11 280	10 860	gas
Wasser	m <sup>3</sup>	32 800	52 500	57 500	water
Helium, flüssig	l	49 300	47 900	38 800	helium, liquid
Stickstoff, flüssig	l	51 900	52 280	38 200	nitrogen, liquid
Abfälle:					waste produced:
hausmüllähnlich	t	47	47	47	refuse-like
recycelt	t	63	53	65	recycled
zur Beseitigung	t	7	9	13	hazardous
Entsorgungskosten (ca.)	EUR	10 950	8 200	11 300	waste disposal costs (approx.)

### Veröffentlichungen und Vorträge • Publications and Lectures

Anzahl der Veröffentlichungen der PTB-Mitarbeiter/innen (in wissenschaftlichen Journalen, Büchern, Tagungsbänden etc.) in den Jahren 2013 bis 2016 (vgl. Datenbank „PTB-Publica“ im Internet) und Anzahl der auswärtigen Vorträge, die PTB-Mitarbeiter/innen in diesen Jahren gehalten haben

Number of publications by PTB staff members (in scientific journals, books, conference digests, etc.) between 2013 and 2016 (cf. database “PTB-Publica” on the web) and number of lectures held by PTB staff members outside PTB in these years.

	2013*	2014*	2015*	2016
Veröffentlichungen • Publications	737	783	718	675
Vorträge • Lectures	1097	1239	1087	949

\* Die Daten aus den vergangenen Jahren (vgl. die entsprechenden Jahresberichte) wurden aktualisiert, da die Angaben lediglich den Stand der Datenbank zum Redaktionsschluss des Jahresberichts wiedergeben. Nachträge in der Datenbank führen zu einer deutlichen Erhöhung der ursprünglich genannten Zahlen.

\* The data from previous years (compare the respective annual reports) were updated, since the information only gives an account of the state of the database at the time the annual report went to press. Subsequent entries in the database lead to distinctly higher numbers.

**PTB-Seminare im Jahr 2016 • PTB seminars in 2016**

Berechnungen der Messunsicherheit – Empfehlungen für die Praxis  
 Leitung: Dr. Stephan Mieke (8)  
 März 2016

Strategiegespräch zur Rückführung, Forschung und Anwendung großer Kräfte  
 Leitung: Dr. Falk Tegtmeier (1.2)  
 Oktober 2016

Aktuelle Fortschritte von Kalibrierverfahren im Nieder- und Hochfrequenzbereich 2016  
 Leitung: Dr. J. Melcher, Dr. T. Schrader (2.1/2.2)  
 Mai 2016

MATHMET 2016 - International Workshop on Mathematics and Statistics for Metrology  
 Leitung: Prof. Dr. Markus Bär (8.4)  
 November 2016

Datenübertragung für Brennwert-Rekonstruktions-systeme  
 Leitung: Dr. Stefan Sarge (3.3)  
 Juli 2016

DYNAMIC 2016 – 9<sup>th</sup> International Workshop on the Analysis of Dynamic Measurements  
 Leitung: Dr. Sascha Eichstädt (8.4)  
 November 2016

**Gastwissenschaftler, Gäste und Besucher**

**Guest scientists, guests and visitors**

Offensichtlich ist die PTB eine Reise wert. Denn auch im Jahr 2016 fanden wieder zahlreiche Besucher aus aller Welt und aus den Regionen rund um die beiden Standorte (Berlin, Braunschweig) ihren Weg in die PTB – für eine fachliche Zusammenarbeit, den metrologischen Austausch oder um ein grundsätzliches Informationsbedürfnis zu stillen. Insgesamt wurden 14 623 Besucher gezählt.

The numbers don't lie – PTB is worth a visit! In 2016, as in years past, PTB welcomed numerous visitors from around the world, as well as from the regions near Berlin and Braunschweig, PTB's two sites. Our visitors pursued scientific cooperation projects, exchanged metrological expertise and sought out answers to fundamental questions, among many other activities. A total of 14,623 visitors were recorded.

	Braunschweig	Institut Berlin
Fachbesucher* • Visiting specialists*	9328	1935
Allgemeine Öffentlichkeit • General Public	1935***	1425**

\* Hier sind vor allem Teilnehmer an Seminaren, Workshops, Tagungen und Kolloquien gemeint.

\* This refers primarily to participants in seminars, workshops, conferences and colloquia.

\*\* Hier sind vor allem die Besucher der „Langen Nacht der Wissenschaft“ gezählt.

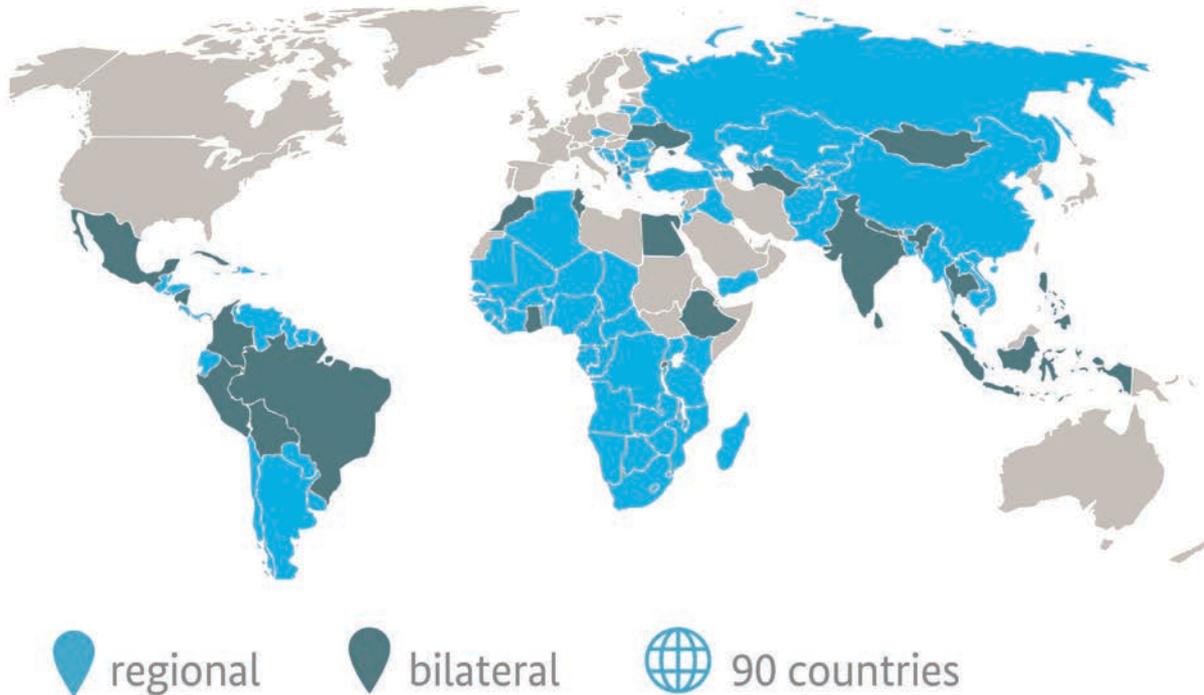
\*\* This refers primarily to visitors to the “Long Night of Science” (Lange Nacht der Wissenschaften).

\*\*\* Hier sind vor allem Besucher im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit (Besucherdienst) gezählt. Insgesamt besichtigten 96 Gruppen die PTB in Braunschweig.

\*\*\* This refers primarily to visitors within the scope of public relations (visits by the general public). Altogether, 96 groups visited PTB in Braunschweig.

Projektpartner der PTB

PTB's project partners



**Internationale Zusammenarbeit**

Die Qualitätsinfrastruktur-Projekte des Fachbereichs Technische Zusammenarbeit verbessern die Situation von Entwicklungs- und Schwellenländern. Mehr als 90 Länder und Regionen werden befähigt, am internationalen Handel teilzunehmen; der Verbraucher-, Umwelt- und Gesundheitsschutz wird sichergestellt. Die Mitarbeiter und Experten des Fachbereichs beraten Regierungen und Ministerien, Institutionen der Qualitätsinfrastruktur sowie kleine und mittlere Unternehmen.

Das Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung finanziert die Projekte.

**Volumen 2016**

Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung 21,6 Mio €

**International Cooperation**

The quality infrastructure projects of PTB's Department of "Technical Cooperation" (TC): These projects help improve the situation in developing countries and countries in transition and enable the countries and regions marked with flags or logos to take part in international trade; the protection of the consumers, of the environment and of health is ensured. The employees and experts of the TC Department advise governments, ministries, QI institutions as well as SMEs.

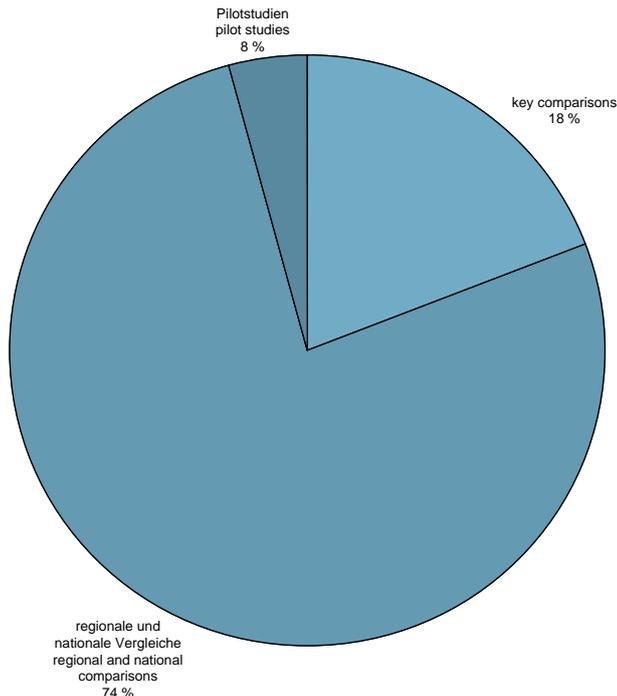
The projects are funded by the Federal Ministry for Economic Cooperation and Development (BMZ).

**Funding volume 2016**

Federal Ministry for Economic Cooperation and Development 21.6 million €

**Internationale Vergleichsmessungen • International comparison measurements**

Die PTB nahm im Berichtsjahr an 47 Vergleichsmessungen teil, und zwar an 9 Schlüsselvergleichen, 36 regionalen/nationalen Vergleichen und 2 Pilotstudien. 70 % der Vergleichsmessungen waren von direkter Relevanz für die Kalibrier- und Messmöglichkeiten der PTB im Rahmen des CIPM-MRA. An 9 Vergleichsmessungen nahm die PTB als Pilotlabor teil.



In the year under report, PTB took part in 47 comparable measurements, namely 9 key comparisons, 36 regional/national comparisons and 2 pilot studies. 70 % of the comparable measurements were of direct relevance to the calibration and measurement capabilities of PTB within the scope of the CIPM MRA. PTB participated in 9 comparable measurements as a pilot lab.

**Nationale Normungsvorhaben • National standardization projects**

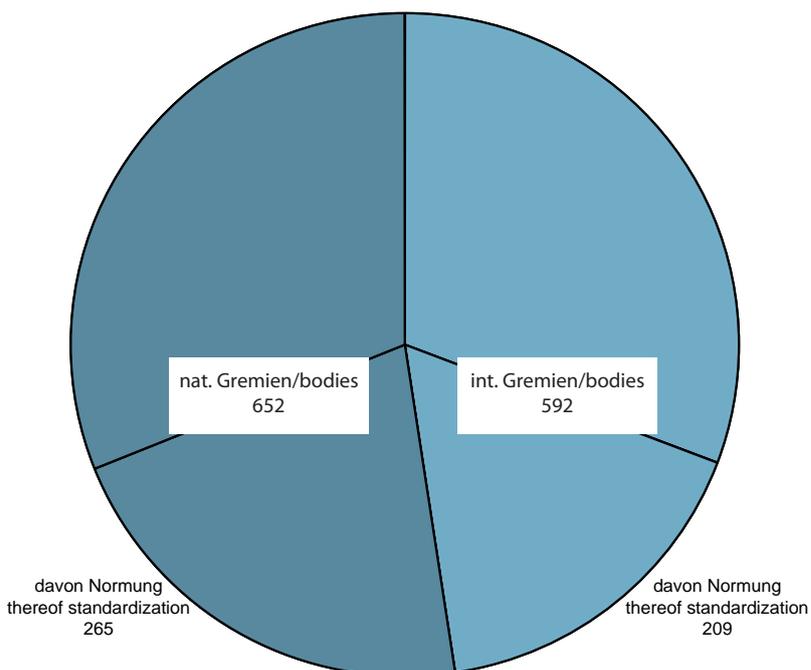
Die PTB engagierte sich im Jahr 2016 in 652 nationalen Gremien, darunter in 265 Normungsgremien. Insgesamt hat sie dabei 99-mal die Leitung inne.

PTB participates in 652 national bodies, among these 265 in the field of standardization. PTB heads a total of 99 of these bodies.

**Internationale Normungsvorhaben • International standardization projects**

Die PTB engagierte sich im Jahr 2016 in 592 internationalen Gremien, darunter in 209 Normungsgremien. Insgesamt hat sie dabei 94-mal die Leitung inne.

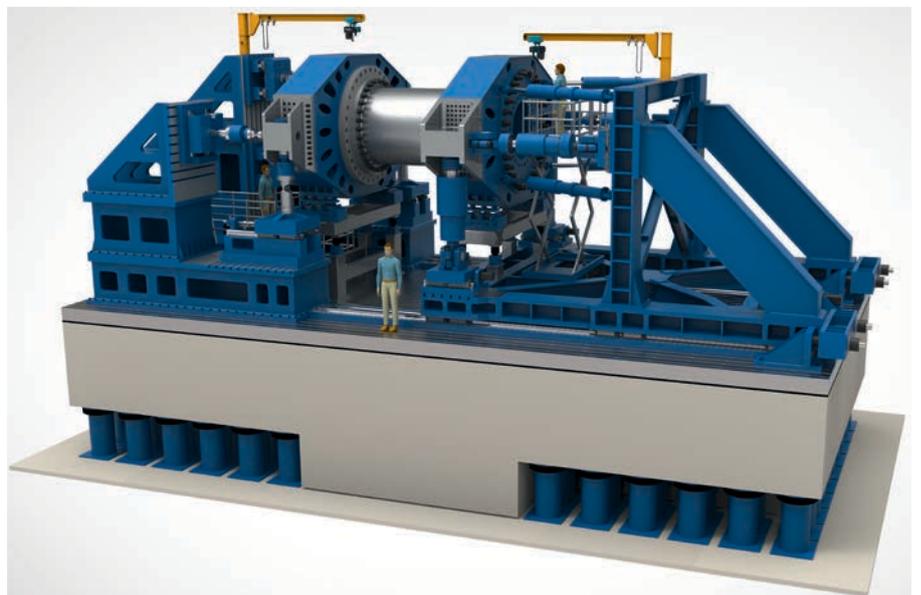
PTB participates in 592 international bodies, among these 209 in the field of standardization. PTB heads a total of 94 of these bodies.





# Abteilung 1

## Mechanik und Akustik



Die Aufgaben der Abteilung 1 werden den drei Themenbereichen *Masse und abgeleitete Größen*, *Durchfluss* sowie *Akustik, Ultraschall, Beschleunigung* zugeordnet. Abteilungsübergreifende Projekte wie das Kompetenzzentrum „Wind“ und das Avogadro-Projekt zur Neudefinition der SI-Einheit Kilogramm haben eine besondere Bedeutung. Nachfolgend werden wichtige Arbeiten und Schwerpunkte sowie aktuelle Entwicklungen auf diesen Gebieten vorgestellt.

### Masse und abgeleitete Größen

Im Themenbereich *Masse und abgeleitete Größen* wird in den Fachbereichen 1.1, 1.2, 1.3, 1.7 und 1.8 – basierend auf dem Einheitengesetz, dem Mess- und Eichgesetz, den zugehörigen Verordnungen sowie dem Beschussgesetz – an der Darstellung und Weitergabe der mechanischen Einheiten für die Masse, die Kraft, das Drehmoment und den dynamischen Druck gearbeitet.

Im Februar 2016 wurden die beiden Arbeitsgruppen *Festkörperdichte* und *Avogadro-Konstante* von der Abteilung 3 in die Abteilung 1 umgesetzt, damit die Aktivitäten zur Darstellung der Masse-Einheit Kilo-

gramm im Rahmen des Avogadro-Projekts besser gebündelt sind. Zusammen mit der Arbeitsgruppe *Darstellung Masse* wurde hierzu der neue Fachbereich 1.8 *Masse – Darstellung der Einheit* gegründet. Der Fachbereich 1.1 wurde gleichzeitig umbenannt in *Masse – Weitergabe der Einheit*.

Beide Fachbereiche führten – mit Unterstützung weiterer Fachbereiche – den PTB-Workshop „Round and ready – dissemination of the kg via Si spheres“ durch. 82 Gäste aus mehr als 40 Ländern aus allen Erdteilen nahmen an diesem Workshop teil (Bild 1), an den sich das Helmholtz-Symposium „The realization of the unit of mass in the new SI“ anschloss.

Die XPS/XRF-Apparatur, die in den letzten Jahren im Fachbereich 7.1 *Radiometrie mit Synchrotronstrahlung* konstruiert und aufgebaut wurde, zog im März 2016 von Berlin-Adlershof nach Braunschweig in den Bessel-Bau um (Bild 2). Dadurch ist nun ein Vakuumtransfer der Si-28-Kugeln zwischen dieser Apparatur und dem Massekomparator möglich.

Das BIPM organisiert eine Pilotstudie zur Prüfung der in der *mise en pratique* vorgeschlagenen Me-

Bild 1: Teilnehmer am PTB-Workshop „Round and ready – dissemination of the kg via Si spheres“



thoden zur Darstellung und Weitergabe der Masse-Einheit nach der geplanten Neudefinition auf der Grundlage der Planck-Konstante. Außer der PTB nehmen noch LNE (Frankreich), NIST (USA), NMIJ (Japan) und NRC (Kanda) an dieser Pilotstudie teil. Die PTB bestimmte hierfür – rückgeführt auf einen festgelegten Wert der Planck-Konstante – mit neuen Oberflächen- und Volumenmessungen die Masse der Si-28-Kugel AVO28-S8c. Die Arbeitsgruppe

Titelbild:

5-MN · m-Drehmoment-Normalmesseinrichtung des Kompetenzzentrums für Windenergie

*Darstellung Masse* kalibrierte mit dieser Kugel die Masse von vier TransfERNormalen, und zwar eines PtIr-Prototypen, einer Kugel aus natürlichem Silizium und zwei Stahlzylindern. Im Oktober kehrten diese TransfERNormale vom BIPM zur Überprüfung ihrer Masse-Stabilität zur PTB zurück.

Die PTB will auch die Verwendung von natürlichem Silizium zur Darstellung, Bewahrung und Weitergabe des neuen Kilogramms möglich machen. Dafür wird in der Arbeitsgruppe *Festkörperdichte* eine Apparatur nach der Methode der magnetischen Flo-tation aufgebaut, in der die Dichte von Kugeln aus natürlichem Silizium über einen hydrostatischen Vergleich mit Si-28-Kugeln bestimmt werden soll. Mithilfe von zusätzlichen Volumen- und Oberflächen-Messungen kann mit diesen „quasi-primären“, natürlichen Si-Kugeln das neue Kilogramm dargestellt werden.

Als Leuchtturm-Projekt der PTB wurde die Arbeitsgruppe *Avogadro-Konstante* im Oktober durch den Wissenschaftsrat evaluiert. Nach einem Übersichtsvortrag wurden den Evaluatoren auf acht Postern und bei einer Besichtigung des Kugelinterferometers die Details des Projekts erläutert.

Der zweite und letzte Si-28-Einkristall des Projekts „Kilogramm-2“ (siehe Nachricht des Jahres 2015) wurde am 1. Juni 2016 an die PTB ausgeliefert. Aus dem ersten Einkristall dieses Projekts wurden inzwischen ca. 50 Proben und zwei Si-28-Kugeln gefertigt und damit alle nötigen Größen für die Bestimmung der Avogadro-Konstante gemessen. Die-

se Messungen werden einen wichtigen Beitrag für die Festlegung der Werte der Planck- und Avogadro-Konstanten im neuen Einheiten-System leisten.

Zu den Kernaufgaben des Fachbereichs 1.1 *Masse – Weitergabe der Einheit* gehören in den Arbeitsgruppen *Waagen, Dynamisches Wägen* und *IT-Wägetechnik* die Prüfung und Konformitätsbewertung von nichtselbsttätigen und selbsttätigen Waagen sowie Waagenmodulen.

Seit dem 20. April 2016 sind die europäischen Richtlinien für Messgeräte („MID“ 2014/32/EU, selbsttätige Waagen nach Anhang VIII) und für nicht-selbsttätige Waagen („NAWID“, 2014/31/EU) vollständig in Kraft. Durch frühzeitige Information und individuelle Beratung der Hersteller von Waagen und Waagenmodulen war es möglich, den Übergang bei der Konformitätsbewertung von Waagen (Modul B) reibungslos zu gestalten. Die Zusammenarbeit diesbezüglich mit der Fachabteilung „Wägetechnik“ im Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau (VDMA) war äußerst hilfreich. Um die Prozesse zwischen den Geräteherstellern und dem Bereich Wägetechnik der Konformitätsbewertungsstelle (KBS) der PTB weiter zu verbessern, fand im November 2015 ein gemeinsamer Workshop in der PTB statt, der von allen Teilnehmenden als sehr intensiv und produktiv wahrgenommen wurde. Die dort herausgearbeiteten Verbesserungspotenziale führten bereits zu Veränderungen der Prozesse bei Industrie und PTB und werden auch zukünftig in die Zusammenarbeit einfließen.

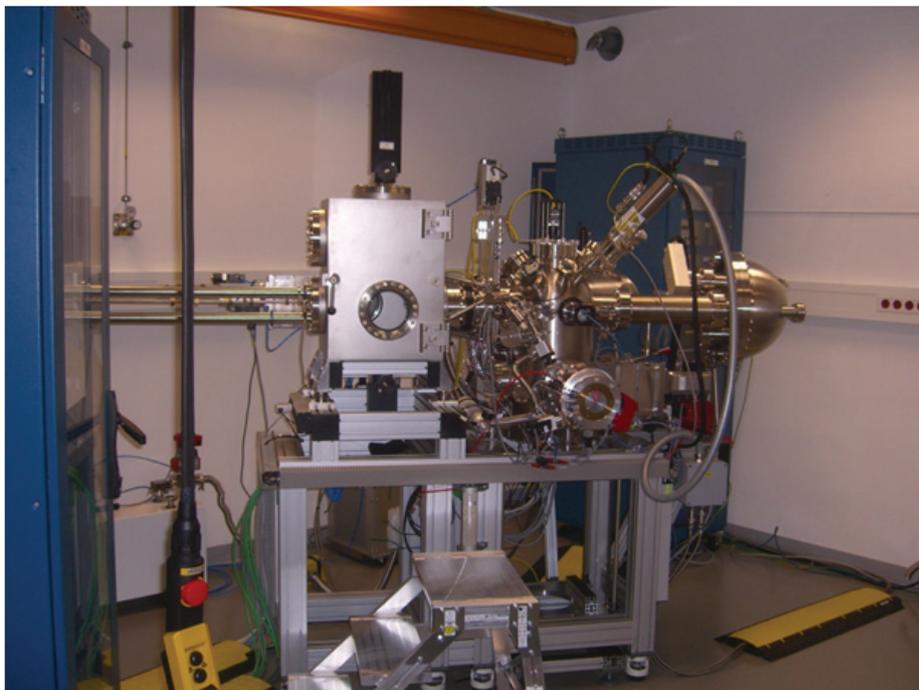


Bild 2: Die XPS/XRF-Apparatur im Bessel-Bau nach dem Umzug aus Berlin-Adlershof

Die in 2015 vom WELMEC-Komitee akzeptierte Änderung der Guide-Struktur der WELMEC-Arbeitsgruppe 2 zur Umsetzung des „Freiwilligen Systems zur modularen Bewertung von Messgeräten“ (WELMEC Guide 8.8) wurde mit Leben gefüllt. Der Guide zur Thematik „Price Totalizers and Price Computing Devices“, an dessen Erstellung die PTB wesentlich beteiligt war, wurde vom WELMEC-Komitee im Mai 2016 bestätigt. Ein weiterer Guide zum Thema „Indicators“ wurde von einer weiteren Projektgruppe unter Beteiligung der PTB entwickelt und auf dem Treffen der WELMEC-Arbeitsgruppe 2 im September 2016 vorgestellt, diskutiert und bestätigt. Aktuell wird ein „Overall Guide“ erstellt, der beschreiben soll, auf welche Weise die auf der Grundlage der technischen Guides erlangten Informationen aufbereitet werden müssen, um im Rahmen des Bewertungskonzepts nach WELMEC Guide 8.8 in Baumusterprüfbescheinigungen einfließen zu können. Es ist wichtig, in diesem Prozess alle Aspekte des gesetzlichen Messwesens im Blick zu behalten, wie z. B. Fairness im Handel, Schutz von Verbrauchern und Umwelt, aber auch die Umsetzbarkeit der entstehenden Leitfäden durch Hersteller und Konformitätsbewertungsstellen. Eine Abstimmung unter den Mitgliedsländern der Europäischen Union ist diesbezüglich unabdingbar, um eine adäquate Nutzung der Leitfäden in ganz Europa zu ermöglichen.

Im Herbst 2015 startete ein durch das BMBF gefördertes Projekt zur Untersuchung der messtechnischen Eigenschaften eines Sensors auf der Basis von Keramikfedern (CERAFORCE). Beteiligt sind neben der PTB die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung und drei mittelständische Unternehmen. Die PTB unterstützt zunächst die Verbesserung des Herstellungsprozesses der Keramikfedern durch messtechnische Untersuchungen und Simulationen. Im Weiteren sind Untersuchungen zur Auswertbarkeit der erreichbaren Signale geplant, die direkt in die Entwicklung eines möglichen Sensorkonzepts Eingang finden werden.

Die PTB ist an einem EMPIR-Projekt zur Entwicklung von Kalibrierleitfäden für automatische Waagen (AWICal) beteiligt. Konkret geht es um drei unterschiedliche Geräteklassen – automatische Waagen zur Einzelwägung, Waagen zur Bestimmung von Achslasten während der Fahrt und automatische Abfüllwaagen. Auf der Grundlage der bisher entwickelten Vorschläge und Entwürfe sollen nun in einem ersten Schritt Messungen an eigenen Geräten und in einem zweiten Schritt Messungen

an einem zentral von einem Industriepartner zur Verfügung gestellten Gerät durchgeführt werden. Die PTB koordiniert die Messungen im Bereich der automatischen Waagen zur Einzelwägung.

Im Sommer 2016 fand in Peking das erste OIML Training Center statt – Thema waren die nicht-selbsttätigen Waagen. Mit mehr als 50 Teilnehmern aus Asien, Afrika und Südamerika fanden theoretische und praktische Trainingseinheiten in den Räumen des chinesischen metrologischen Staatsinstituts NIM statt, die von den chinesischen Kollegen und zwei Tutoren aus dem Fachbereich 1.1 der PTB gestaltet wurden. Auch wenn die nicht-selbsttätigen Waagen und damit die OIML-Empfehlung R76 im Mittelpunkt standen, vermittelte das Training auch Verständnis für das gesetzliche Messwesen im Allgemeinen sowie für die OIML und ihre Rolle im Speziellen.

Der Fachbereich 1.2 *Festkörpermechanik* besteht aus den Arbeitsgruppen *Darstellung Kraft*, *Darstellung Drehmoment* und *Kraftmesstechnik* und realisiert die Normale für Kraft, Drehmoment und periodische Kräfte. Mit Kraft-Normalmesseinrichtungen können Kräfte von 0,5 N bis 16,5 MN und mit Drehmoment-Normalmesseinrichtungen Drehmomente von 1 mN · m bis 1,1 MN · m und mit den dynamischen Messeinrichtungen periodische Kräfte mit Frequenzen bis zu 2000 Hz realisiert werden. Die Weitergabe dieser Einheiten erfolgt über die Kalibrierung von Kraft- und Drehmomentmessgeräten in den Normalmesseinrichtungen.

Im Juni 2016 wurde das vom Fachbereich 1.2 koordinierte EMRP-Forschungsprojekt SIB63 „Force traceability within the meganewton range“ erfolgreich abgeschlossen und die Ergebnisse im Rahmen eines Workshops und eines Stakeholder-Meetings präsentiert (<https://www.ptb.de/emrp/forcemetrology.html>). Über einen Zeitraum von drei Jahren haben dabei zehn europäische nationale Metrologie-Institute sowie die deutsche Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung Verfahren entwickelt und untersucht, mit deren Hilfe Kräfte im Bereich bis zu 50 MN rückführbar gemessen werden können. In den vier fachlichen Arbeitspaketen – zwei davon unter Leitung von Mitarbeitern des Fachbereichs 1.2 – wurden Kraft-Transfornormale nach dem Build-up-Prinzip untersucht und optimiert, Mehrkomponentenmessungen durchgeführt und analysiert, die Einflüsseffekte unterschiedlicher zeitlicher Abläufe (Kriechen, Hysterese) modelliert und bewertet sowie anwenderfreundliche Werkzeuge zur Bestimmung von korrigierten Messer-

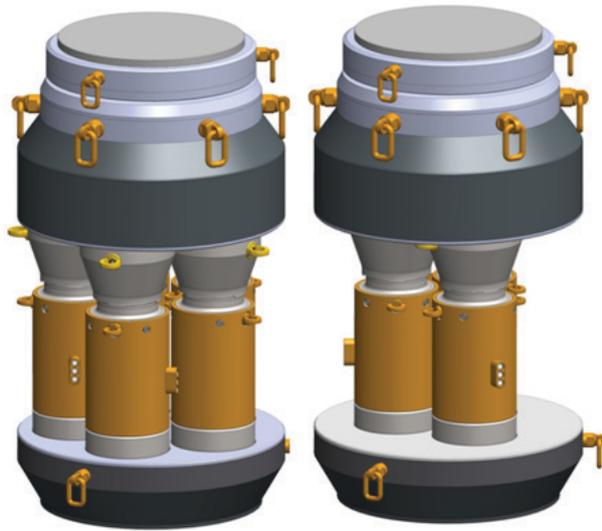


Bild 3: CAD-Modell des optimierten 50-MN/30-MN-Build-up-Systems

gebnissen und der zugehörigen Messunsicherheiten entwickelt. Ein besonderer Schwerpunkt lag in der Untersuchung von Build-up-Systemen, bei denen mehrere gleichartige Kraftaufnehmer in einer Art Parallelschaltung eingesetzt werden, um deren Messbereich zu vervielfachen. Mit diesem Verfahren ist es zum Beispiel möglich, fünf in der größten Kraft-Normalmesseinrichtung der PTB bis 10 MN kalibrierte Aufnehmer in paralleler Anordnung auf einer Grundplatte und mit einer gemeinsamen Druckplatte einzusetzen und bis 50 MN zu belasten (siehe linke Seite im Bild 3). Die Signale der einzelnen Aufnehmer werden parallel gemessen, was nicht nur eine Information über die Gesamtkraft ergibt, sondern darüber hinaus auch auf die Verteilung der Kraft auf die Einzelaufnehmer schließen lässt und somit eine Aussage über die Axialität der Kraft

in der Messeinrichtung ermöglicht. Die Untersuchungen haben ergeben, dass sich die konstruktive Auslegung des Systems und der Druckplatten zum Teil stark auf die erreichbaren Messunsicherheiten auswirkt.

Das neue Build-Up-System ermöglicht zukünftig die Rückführung großer Kraftmaschinen bis 50 MN. Um zukünftigen den Bedarf an Kalibrierungen und Prüfungen für größte Kräfte zu ermitteln, hat die PTB gemeinsam mit dem iBMB/MPA der TU Braunschweig das 301. PTB-Seminar „Strategiegespräch zu großen Kräften: Rückführung, Forschung und Anwendung“ veranstaltet (Bild 4). Das Seminar zeigte, dass die Nachfrage nach Kalibrierungen und Prüfungen für größte Kräfte zunimmt.

Als neues nationales Normal wurde eine neue 200-kN-Kraft-Normalmesseinrichtung in Betrieb genommen (Bild 3, links), die über einige Besonderheiten verfügt, sodass eine gemeinsame Nutzung der Fachbereiche 1.1 und 1.2 gegeben ist. So wurde neben ihrer Funktion als Normal für die Darstellung der Einheit der Kraft im Bereich bis 200 kN ein Klimaschrank integriert, in dem Wägezellen von Waagen bei den entsprechenden Temperaturen (-10 °C, 20 °C und 40 °C nach OIML R 60) untersucht werden können. Für diese Sensoren war außerdem ein besonders großer Messbereich von 50 N bis 200 000 N notwendig. Dazu werden zwei binäre Massestapel mit einem integrierten Ersatzlastsystem zur Vermeidung von Lastsprüngen beim Wechsel der Kraftstufe verwendet.

Neuartig und bisher weltweit einmalig ist die Ausführung der Maschine mit einer zusätzlichen Tra-



Bild 4: Teilnehmer des 301. PTB-Seminars



Bild 5: 200-kN-Kraft-Normalmesseinrichtung als Prinzipbild (links) und Fotografie der Montage einer großen Masse-scheibe

verse, die nach einem im Fachbereich entwickelten und patentierten Verfahren eine kombinierte Zug- und Druckkraftmessung ohne Änderung der Einbausituation oder der Krafteinleitungsteile des Aufnehmers ermöglicht. So kann erstmalig an Kraftaufnehmern der Nulldurchgang in einer Direktbelastungseinrichtung mit geringsten Messunsicherheiten untersucht werden.

Die Einrichtung ist auch die erste Kraft-Normalmesseinrichtung der PTB, die für eine relative erweiterte Messunsicherheit von 0,001 % spezifiziert wurde. Nach ersten Messungen wird dieser Wert erreicht, bisher lag der beste Wert bei 0,002 %. Damit kann die PTB in diesem Bereich eine reduzierte Messunsicherheit bei Kalibrierungen anbieten. Um dies zu erreichen, wurden hohe Anforderungen an die Belastungsmassen und das Lastgehänge gestellt. Die Massen müssen alle Qualitätsmerkmale der Klasse F1 der OIML R 111 erfüllen. Dazu war z. B. eine Oberflächenrauigkeit  $R_z \leq 2 \mu\text{m}$  einzuhalten, die magnetische Suszeptibilität musste  $\leq 0,2 \mu\text{T}$  sein. Diese Werte wurden tatsächlich deutlich unterschritten. Die besonderen Anforderungen zeigen sich schon rein optisch in Form der zum Chromglanz polierten Massen mit ca. 3 m Durchmesser (Bild 5, rechts).

Mit der neuen Anlage können akkreditierte Laboratorien mit einer geringeren Messunsicherheit angeschlossen werden. Der Bereich von 50 kN bis 200 kN ist mit ca. 35 DAkkS-akkreditierten Laboratorien der am stärksten nachgefragte Messbereich, der zudem aus konstruktiven Gründen im Aufnehmerbau und in der Anwendung die höchsten Anforderungen an eine geringe Messunsicherheit stellt. Mit der neuen Einrichtung hat der Fachbereich auch in der Zukunft herausragende Möglichkeiten zur Forschung in der Kraftmess- und Wägezellentechnik.

In der Arbeitsgruppe *Darstellung Drehmoment* wurde das im Oktober 2015 von der PTB koordinierte EMPIR-Projekt „Torque Measurement in the MN · m range“ weiter bearbeitet (<https://www.ptb.de/emrp/ind14-home.html>). Hauptziel des Forschungsprojektes ist es, eine Rückführung für die Messgröße Drehmoment in Gondelprüfständen zu realisieren. Im Rahmen dieses Programms wurde eine Übersicht über die weltweit existierenden Gondelprüfstände erstellt. Dabei wurden alle relevanten technischen Parameter zusammengestellt und die derzeit existierenden Messmethoden zur Kalibrierung des Drehmomentes in diesen Prüfständen beschrieben. Im Rahmen des von der PTB geleiteten Work-Packages 2 „Torque Transfer Standards“ wurde ein von der PTB beschaffter 5-MN · m-Drehmomentaufnehmer untersucht, der nicht nur das Drehmoment, sondern zusätzlich Axialkräfte, Biegemomente und Querkräfte messen kann. Dieser Aufnehmer wurde in die 1,1-MN · m-Drehmoment-Normalmesseinrichtung eingebaut und nach

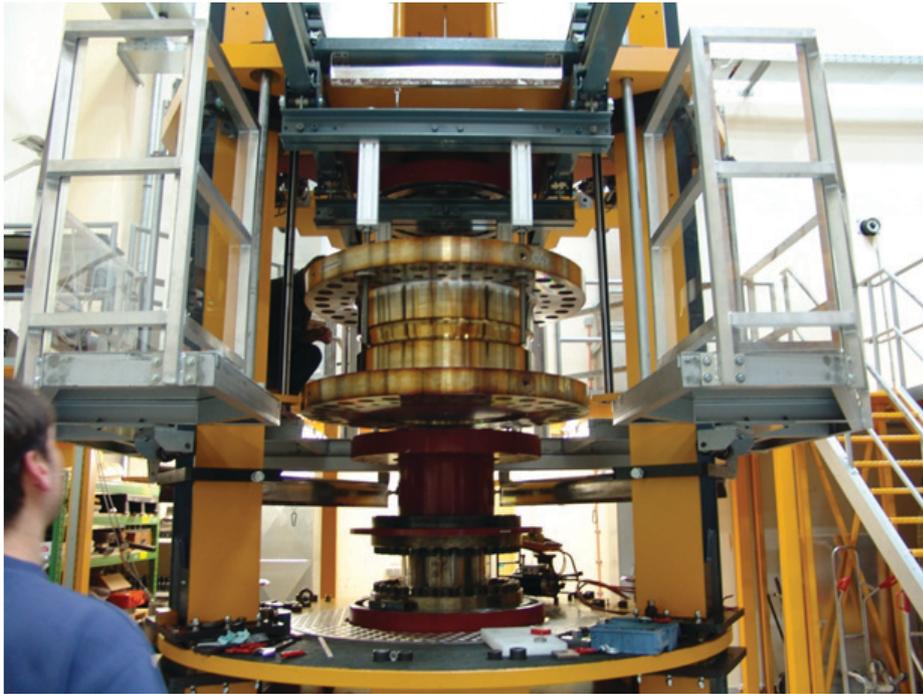


Bild 6: Einbau des 5-MN · m-Drehmomentaufnehmers in die 1,1-MN · m-Drehmoment-Normalmesseinrichtung der PTB.

DIN 51309 im Teilbereich bis 1,1 MN · m kalibriert (Bild 6).

Während der Messkampagne wurde der Aufnehmer ebenfalls in verschiedenen kleineren Messbereichen gemessen, um mithilfe dieser Daten eine Extrapolationsmethode zu entwickeln, die es ermöglichen soll, auf Drehmomente oberhalb von 1,1 MN · m und deren Messunsicherheit zu extrapolieren.

Ein weiterer Schritt zur metrologischen Charakterisierung des 5-MN · m-Aufnehmers war eine Kalibrierung nach DIN EN ISO 376 bis 4 MN in der 16,5-MN-Kraft-Normalmesseinrichtung der PTB. Diese Messung wurde mit einem 6-MN-Kraft-Build-up-System kombiniert, um die geometrische Ausrichtung des 5-MN · m-Aufnehmers in der 5-MN-Kraftmessmaschine zu überprüfen.

Um zukünftig Drehmomentaufnehmer über 1,1 MN · m kalibrieren zu können, wird für den Aufbau des neuen Kompetenzzentrums „Wind“ insbesondere an der Entwicklung und Detailkonstruktion einer neuen 5-MN · m-Drehmomentnormalmesseinrichtung gearbeitet.

Im Fachbereich 1.7 hat die Arbeitsgruppe 1.73 *Stoßdynamik* bereits mehrfach Anfragen aus der Industrie bezüglich einer dynamischen Kalibrierung von Impulshämmern erhalten. Deshalb wurde im Verlauf des Jahres 2016 damit begonnen, auch hier Messeinrichtungen zur Primärkalibrierung aufzubauen und geeignete Mess- und Auswerteverfahren zu untersuchen. Bereits im Anschluss des vom

mexikanischen Staatsinstitut CENAM im Jahr 2014 veranstalteten Metrologie-Symposiums war es möglich, Schwerpunkte für eine bilaterale Forschungs-kooperation mit dem Fachbereich 1.7 auszuloten. Anlässlich eines im Folgejahr durchgeführten Peer-Reviews wurden dann am CENAM erste gemeinsame Messungen zur dynamischen Charakterisierung von Kraftaufnehmern und Impulshämmern durchgeführt.

Die mit einem integrierten Kraftaufnehmer ausgestatteten Impulshämmer werden in der Industrie und Forschung in großem Umfang zur Modalanalyse von mechanischen Strukturen eingesetzt. Auf dem Messobjekt applizierte Beschleunigungssensoren erfassen dabei die Antwort auf den eingebrachten Stoßimpuls. Typische Untersuchungsziele sind die Erfassung von Übertragungsfunktionen, Resonanzen und Dämpfungen, beispielsweise im Zusammenhang mit Modellvalidierungen oder Schadensuntersuchungen.

Die nun aufgebauten Messeinrichtungen verwenden einen reibungsarm gelagerten Massekörper, aufgehängt an Fäden oder geführt in Luftlagern, deren Inertialkraft während des Hammerstoßes mithilfe eines Beschleunigungssensors oder Laser vibrometers erfasst wird und das Referenzsignal darstellt. Als Kalibrierergebnis wird typischerweise die aus dem Spitzenwertverhältnis der Pulshöhen bestimmte Empfindlichkeit oder das entsprechende Amplitudenverhältnis im Frequenzbereich spezifiziert. Bild 7 zeigt die mit einem Impulshammer unter Verwendung unterschiedlich harter Ham-

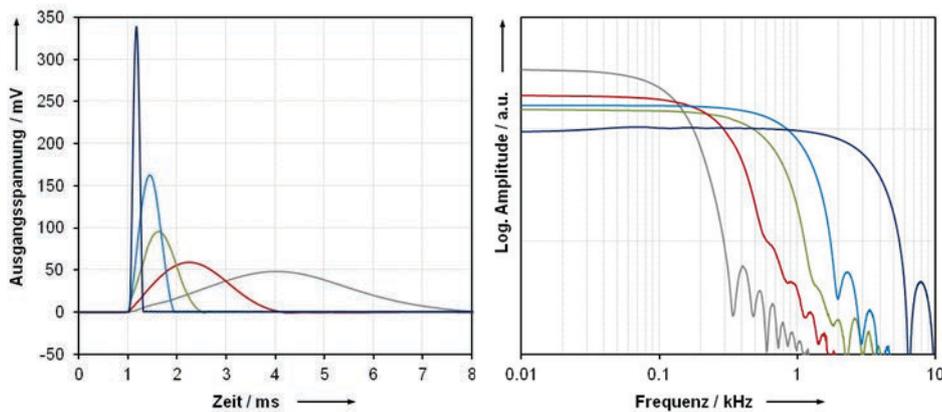


Bild 7: Kraftsignale eines Impulshammers im Zeit- und Frequenzbereich, aufgenommen mit unterschiedlich harten Hammerspitzen

merspitzen gemessenen Kraftpulse im Zeit- und Frequenzbereich. Harte Spitzen erzielen kurze Pulse mit höherfrequenten Signalanteilen, weiche Spitzen breite Pulse mit entsprechend niedrigerem Frequenzinhalt. Das Thema „Impulshammerkalibrierung“ wurde beim „Workshop on Analysis of Dynamic Measurements“ erstmals präsentiert [1] und stieß in der Community auf breites Interesse.

## Durchfluss

Der Themenbereich *Durchfluss* wird in den Fachbereichen 1.4 *Gase* und 1.5 *Flüssigkeiten* bearbeitet. Er befasst sich mit der Darstellung und Weitergabe der Einheiten für Menge, Durchfluss und Geschwindigkeit strömender Gase, Menge und Durchfluss strömender Flüssigkeiten sowie der Menge von Flüssigkeiten in ruhendem Zustand.

Unter federführender Beteiligung der Arbeitsgruppe 1.41 *Strömungsmesstechnik* konnten im Bereich der Anemometerkalibrierung sowohl ein DKD-Ringvergleich als auch ein internationaler Schlüsselvergleich mit neun Teilnehmern abgeschlossen und eine bislang nicht erreichte Vergleichbarkeit der Kalibrierergebnisse erzielt werden.

Mit dem erfolgreichen Abschluss eines ZIM-Projektes „Entwicklung von Profilsensoren für Laser-Doppler-Velocimeter“ konnte das von Seiten der PTB entwickelte Erweiterungsmodul für kommerzielle LDV-Systeme zur Bestimmung von Strömungsgeschwindigkeitsprofilen vom Kooperationspartner in sein Leistungsangebot aufgenommen werden.

Das MNPQ-Projekt „Transfer-Wind-LIDAR“ wurde nach einer weiteren erfolgreichen Messkampagne auf dem Testfeld des Kooperationspartners Deutsche WindGuard Consulting GmbH abgeschlossen. Dabei wurden insbesondere Vergleichsmessungen mit dem an der Mastspitze in 135 m Höhe montierten, kalibrierten Schalensternanemometer für

Validierungsmessungen analysiert. Die zwischen den Schalensternanemometer- und den Lidar-System-Messergebnissen festgestellten Abweichungen, die bei Messzeiten von über 24 Stunden für zeitlich hochaufgelöste 1-s-Mittelwerte unter 0,5 % lagen, bestätigen das hohe Einsatzpotenzial des PTB-LIDAR-Systems als künftiges Bezugsnormal.

Ein Schwerpunkt der Arbeitsgruppe 1.42 *Gas-messgeräte* war die Weiterentwicklung von Transfornormalen auf Basis kritisch betriebener Düsen, insbesondere für Durchflüsse im ml/min-Bereich. Aufgrund der über viele Jahre gewonnenen Messergebnisse kann jetzt auch Mikrodüsen mit Halsdurchmessern von 25  $\mu\text{m}$  bis 120  $\mu\text{m}$  und gegenüber der ISO 9300 vereinfachter Geometrie die grundsätzliche Eignung für einen Transfornormaleinsatz ausgesprochen werden.

Mit der Neuordnung des gesetzlichen Messwesens in Deutschland haben sich Ausschüsse und Gremien neu konstituiert, die für die Erarbeitung von Regeln für das Inverkehrbringen und die Verwendung von der MessEV unterliegenden Gasmessgeräten verantwortlich sind. Die Anpassung und Weiterentwicklung dieser Regeln stellen und stellen einen Schwerpunkt der Tätigkeit der Arbeitsgruppe dar.

Für die eichrechtlich abgesicherte Messung von Wasserstoff an Gastankstellen wurden umfangreiche Beratungsaktivitäten ausgeübt. Insbesondere die Festlegung von Anforderungen an die Prüfung der Gaszähler und Zapfsäulen für eine Fahrzeugbetankung mit Wasserstoff bis 900 bar sowie die Konzeption eines Eichnormals auf gravimetrischer Basis standen im Vordergrund. Um eine weltweit einheitliche Konformitätsbewertungspraxis zu erreichen, steht die Arbeitsgruppe in engem Kontakt mit Herstellern und Verwendern sowie mit Behörden in Frankreich und Japan.

Die Kalibrierung von Durchflussmessgeräten für den Bereich von 1 ml/min bis 1 m<sup>3</sup>/min ist für das industrielle Messwesen und für die Rückführung von akkreditierten Kalibrierlaboratorien von zunehmender Bedeutung. Im Rahmen von EURAMET wurden deshalb für diesen Durchflussbereich Vergleichsmessungen mit Stickstoff als Prüfmedium gestartet.

In der Arbeitsgruppe 1.43 Hochdruck-Gas wurde die Beschreibung des Düsenbeiwertes (discharge coefficient)  $c_D$  kritischer Düsen als Funktion der Reynoldszahl  $Re$  weiterentwickelt, verifiziert und auf der FLOMEKO 2016 publiziert. Die neue Formulierung bezieht analytische Ergebnisse der Impuls- bzw. Energieverlustgleichungen laminarer und turbulenter Grenzschichten mit ein und berücksichtigt zudem auch sekundäre Einflüsse der Gaseigenschaften.

Die mehrjährige metrologische Begleitung zur Entwicklung und Inbetriebnahme einer Hochdruck-Rohrprüfstrecke für die chinesische Metrologielandschaft wurde erfolgreich abgeschlossen. Zentrales Qualitätskriterium waren die Kalibrierungen von zwei Sekundärnormalen (Turbinenradgaszählern), die sowohl mit dem PTB-Primärnormal als auch zweimal mit dem neuen Primärnormal durchgeführt wurden (siehe Bild 8). Die Übereinstimmung aller Messungen auf dem Unsicherheitsniveau von 0,07 % über den gesamten Messbereich von 0,1 MPa bis 8 MPa ist ein beeindruckendes Zeugnis der messtechnischen Qualität der neuen Anlage und der Zuverlässigkeit des technischen Konzeptes.

Einer der Schwerpunkte der Arbeitsgruppe 1.51 Flüssigkeitsmessgeräte, zu deren Aufgabenfeldern die Zulassung und Konformitätsbewertung von Flüssigkeitsmessgeräten gehört, war auch 2016 wie bereits im vergangenen Jahr die Umsetzung der Re-

gelungen des neuen Mess- und Eichgesetzes und der zugehörigen Verordnung, z. B. die Aufnahme von Tankdatenerfassungssystemen in die Messgeräteste des Regelermittlungsausschusses und eine aktive Mitarbeit bei der Bearbeitung des §35 der Mess- und Eichverordnung zum Stichprobenverfahren für Verbrauchsmessgeräte.

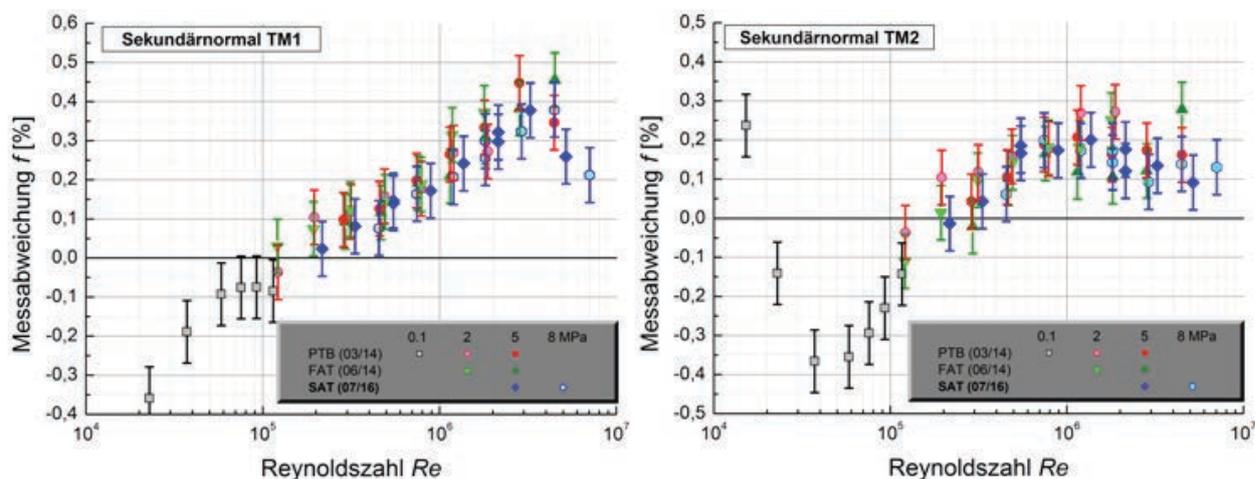
Zu den Aktivitäten im gesetzlich geregelten Bereich gehört auch eine aktive Mitwirkung an den entsprechenden internationalen Dokumenten mit dem Schwerpunkt OIML. Hier konnten insbesondere die Teile 2 und 3 der OIML R 80 für Straßen- und Schienentankwagen mit automatischer Füllstandsmessung, für die der Fachbereich 1.5 als Convenor agierte, erfolgreich zum Abschluss gebracht werden.

Die Arbeitsgruppen 1.52 – Darstellung Flüssigkeitsmessung (ehemals Flüssigkeitsprüfstände) und 1.53 – Weitergabe Flüssigkeitsmessung (ehemals Rückführung Flüssigkeitsmessung) erfuhren neben einer Umbenennung auch eine strukturelle Veränderung der Aufgabengebiete.

In den Aufgabenbereich der Arbeitsgruppe 1.52 Darstellung Flüssigkeitsmessung fallen sowohl die Sicherstellung der Betriebsbereitschaft als auch die Neu- bzw. Weiterentwicklung der Flüssigkeitsnormalmesseinrichtungen des gesamten Fachbereichs.

Wichtig war hier in 2016 die Teilnahme am internationalen Schlüsselvergleich CCM.FF-K2.2011 (Mineralölprüfstände) zur Bestätigung der CMC-Einträge für den Mineralölzählerprüfstand (MÖZ). Der bereits vorliegende Bericht durch das Pilotlabor (VSL) zeigt sehr gute Ergebnisse für die PTB und bestätigt die angegebene Messunsicherheit von 0,05 %.

Bild 8: Messabweichungen der Sekundärnormale TM1 und TM2 zum HD-Primärnormal der PTB (PTB) bzw. zum neuen chinesischen HD-Primärnormal (FAT und SAT)



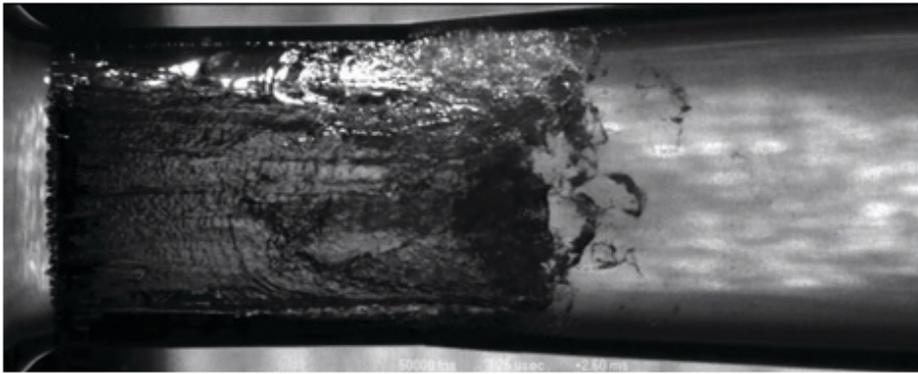


Bild 9: Aufnahme einer kavitierenden Strömung im Inneren eines Herschel-Venturi-Rohres (Durchmesser 11,2 mm, Länge des zylindrischen Halses 11,2 mm, Durchfluss 7,7 m<sup>3</sup>/h)

Zudem wurden nach einem aus Gründen des Arbeits- und Explosionsschutzes notwendig gewordenen Wechsel der Prüfflüssigkeit die vier Volumenbehälter des MÖZ mit 5000 Litern-, 1000 Litern-, 200 Litern- bzw. 100 Litern-Fassungsvermögen mittels unterschiedlicher Methoden gemäß der EURAMET-Guidelines „cg-19“ und „cg-21“ neu kalibriert. Für die volumetrische Bestimmung wurde der sogenannte „filling method“-Ansatz mithilfe einer rückgeführten 100-Liter-Pipette umgesetzt. Eine gravimetrische Bestimmung erfolgte mittels eines hochauflösenden Wägesystems (max 100 kg, Auflösung  $d = 1$  g). Zusätzlich beschäftigen sich aktuelle Arbeiten mit der Volumenbestimmung über ein kalibriertes Durchflussmessgerät. Ziele der Untersuchungen sind neben der rückgeführten Volumenbestimmung ein Vergleich der angewandten Methoden und eine weitere Verbesserung der Messunsicherheit.

In der Arbeitsgruppe 1.53 *Weitergabe Flüssigkeitsmessung* wurde ein neues Verfahren zur Generierung konstanter reproduzierbarer Flüssigkeitsdurchflüsse mittels sogenannter Kavitationsdüsen erprobt. Erste Untersuchungen mit einer Hochgeschwindigkeitskamera in einer speziellen Plexiglas-Düse und mit einer Auflösung von bis zu 140 000 Aufnahmen pro Sekunde ermöglichen neuartige Einblicke in das Verhalten einer kavitierenden Flüssigkeitsströmung im Inneren dieser Düse.

Die gewonnenen Erkenntnisse sind ein wichtiger Bestandteil der laufenden Arbeiten im Fachbereich *Flüssigkeiten*, die sich mit der Entwicklung eines völlig neuartigen Prüfverfahrens für Wasserzähler auf der Basis von Kavitationsdüsen beschäftigen. Das Verfahren soll sich insbesondere durch eine hohe Reproduzierbarkeit der erzeugten Flüssigkeitsdurchflüsse und die Möglichkeit stark verkürzter Prüfzeiten auszeichnen.

Erste Experimente mit den aus der Gasmessung bekannten Venturi-Düsenformen mit toroidalem Düsenhals und mit sogenannten

Herschel-Venturi-Rohren, deren Düsenhals ein Zylinder ist, bestätigten nachweislich die erwartete Durchflusskonstanz nach Unterschreiten eines bestimmten Druckverhältnisses. Auch die Ermittlung der Reproduzierbarkeit des sich einstellenden Durchflusses zeigte mit relativen Standardabweichungen in der Größenordnung von  $10^{-5}$  bis  $10^{-6}$  sehr zufriedenstellende Ergebnisse.

### Akustik, Ultraschall und Beschleunigung

Im Themenbereich *Akustik, Ultraschall und Beschleunigung* werden von den Fachbereichen 1.6 *Schall* und 1.7 *Akustik und Dynamik* metrologische Fragestellungen bearbeitet, die die Darstellung und Weitergabe akustischer und dynamischer mechanischer Einheiten zum Inhalt haben. Ausgehend von Forderungen des Einheiten-, Eich- und Medizinproduktegesetzes werden vielfältige wissenschaftliche Arbeiten durchgeführt. Zudem erfolgen zahlreiche für Gesellschaft und Wirtschaft wichtige Dienstleistungen mit höchster Genauigkeit und Verlässlichkeit.

Im Fachbereich *Schall* wurden die Aktivitäten zur Erforschung der Wirkung von Infraschall und luftgeleitetem Ultraschall auf den Menschen am Arbeitsplatz und im täglichen Leben fortgesetzt. Ein neues Projekt, „EARS 2“, wurde in Zusammenarbeit der Arbeitsgruppen *Hörschall* und *Geräuschmesstechnik* im Rahmen des EMPIR-Programms begonnen, das außerdem Arbeiten zur Weiterentwicklung eines universellen Ohrsimulators (Bild 10) beinhaltet. Im Mittelpunkt steht dabei die Entwicklung und Erprobung einer neuen Kalibriermethode für audiologische Kurzzeit-Stimuli, die bei objektiven Audiometrierverfahren, wie sie z. B. zum Neugeborenen-Hörscreening eingesetzt werden, Verwendung finden.

Der monaural gemessene Speech-Transmission-Index (STI) ist bei der Beurteilung der Übertragungsqualität von Beschallungsanlagen in besonders komplizierten räumlichen Konstellationen



Bild 10: Neugeborenen-Ohrsimulator-Prototyp mit Adaptern zur Ankopplung von Sonden und Einsteckhörern

nicht in der Lage, den Vorteil, den der Mensch durch sein binaurales Hören hat, in die Analyse einzubeziehen. In einem Kooperationsprojekt der Innovationsförderung für den Mittelstand (ZIM) hat die Arbeitsgruppe *Hörschall* deshalb, zusammen mit dem Partner TAC Technische Akustik Grevenbroich, einen binauralen STI (BISTI) entwickelt. In Hörversuchen zur Untersuchung des Zusammenhangs von STI und BISTI mit der subjektiv erreichten Sprachverständlichkeit konnte die bessere Aussagefähigkeit des BISTI für räumlich verteilte Störquellen nachgewiesen werden.

Am neu entwickelten Messplatz zur verbesserten primären Hydrophonkalibrierung in der Arbeitsgruppe *Ultraschall* ermöglicht die verwendete breitbandige Impulsanregung in Kombination mit nichtlinearer Schallausbreitung erstmalig die primäre Kalibrierung von Hydrophonen für die Ultraschall-Medizintechnik in Betrag und Phase, also die Bestimmung der komplexwertigen Übertragungsfunktion mit Anbindung an SI-Basiseinheiten (Meter und Sekunde) ohne zusätzliches Sekundärverfahren. Die in diesem Zusammenhang erarbeitete vollständige Beschreibung der beigeordneten Unsicherheiten für Betrag und Phase (Bild 11) bilden eine wichtige Grundlage für die geplante Übernahme des Verfahrens zur Erweiterung, Verbesserung und Rationa-

lisierung des international kontinuierlich nachgefragten Hydrophonkalibrierangebotes der PTB.

In der Arbeitsgruppe *Geräuschmesstechnik* wurde die Baumusterprüfung von Schallpegelmessgeräten durch die Berücksichtigung der Softwaresicherheitsanforderungen entsprechend dem WELMEC-7.2-Softwareleitfaden erweitert. In Verbindung mit der Arbeitsgruppe *Metrologische Software* (Abteilung 8) wurden die entsprechenden Anforderungen formuliert und ein Fragebogen für die erforderlichen Herstellererklärungen (deutsch und englisch) auf den Webseiten bereitgestellt.

Zum Fachbereich 1.7 *Akustik und Dynamik* gehören die Arbeitsgruppen *Darstellung Beschleunigung*, *Angewandte Akustik* und *Stoßdynamik*.

Nach der erfolgreichen Teilnahme im europäischen Ringvergleich für die Primärkalibrierung von Beschleunigungsaufnehmern bei tiefen Frequenzen (DC; 0,1 Hz–160 Hz) im Jahr 2015 hat die Arbeitsgruppe 1.71 *Darstellung Beschleunigung* im vergangenen Jahr auch am übergeordneten internationalen Ringvergleich (CCAU.V-K3) im Frequenzbereich von 0,1 Hz bis 40 Hz erfolgreich teilgenommen. Damit konnte die Basis für die internationale Anerkennung von PTB-Kalibrierscheinen für Schwingfrequenzen unterhalb von 0,4 Hz im Rahmen des CIPM-MRA gelegt werden. Dieser Frequenzbereich war bislang nur auf nationaler Ebene abgedeckt. Möglich wurde dies durch präzise Untersuchungen des verwendeten Schwingerregers und die Entwicklung eines Korrekturverfahrens, das eine vorhandene geringfügige Krümmung der Luftlagerführung kompensiert. Der abgeschätzte Krümmungsradius beträgt dabei ca. 3100 m, wobei die genutzte Schwingamplitude der Einrichtung nur 60 mm beträgt. Da solche Störeffekte im Rahmen der Berichterstattung zum europäischen Vergleich (EURAMET.AUV.V-K3) auch von Metrologieinstituten anderer Staaten bekannt wurden, hat die PTB-Arbeitsgruppe die Ergebnisse

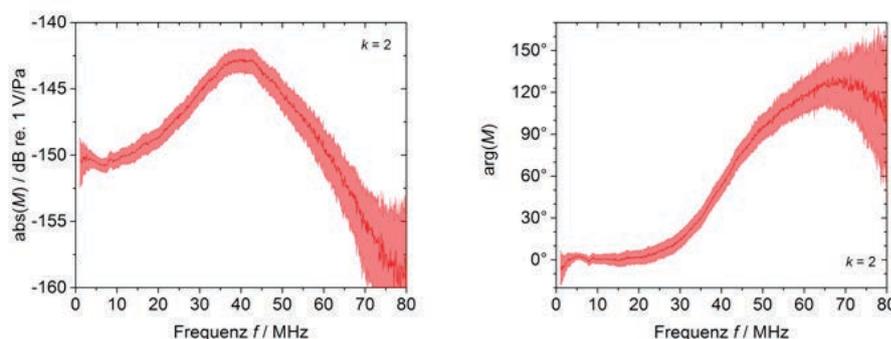


Bild 11: Durch primäre Kalibrierung erhaltene Übertragungsfunktion  $M$  eines Membranhydrophons, dargestellt als Amplituden- (links) und Phasengang (rechts) mit den Messunsicherheiten (farbiger Bereich)

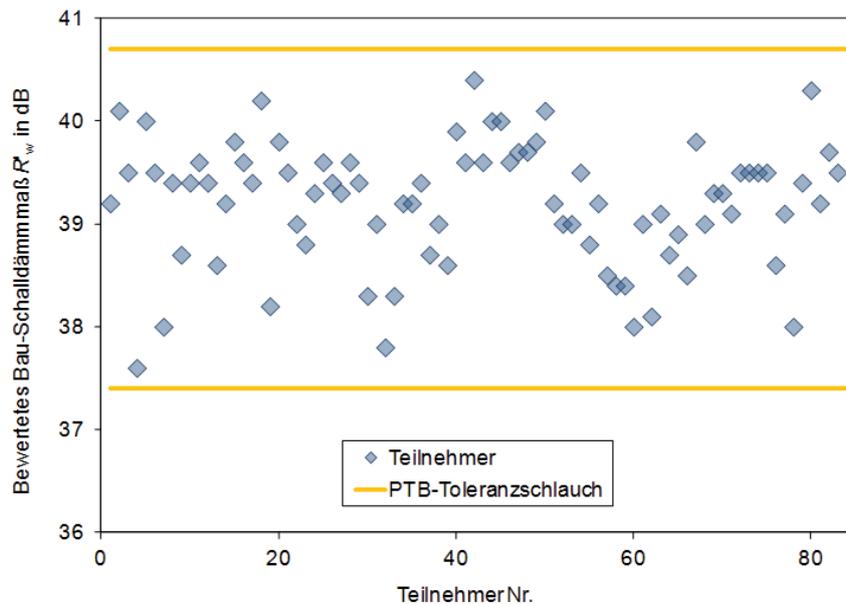


Bild 12: Luftschall-Messergebnisse der Teilnehmer der VMPA-Vergleichsmessungen und zugehöriger PTB-Toleranzschlauch

der Untersuchung sowie die Vorgehensweise zur Korrektur in der Fachzeitschrift *Metrologia* veröffentlicht [2].

In einem nächsten Schritt wird nun die Eintragung der durch die Vergleichsmessungen nachgewiesenen Messunsicherheiten in die Key Comparison Data Base des BIPM in Paris beantragt.

Zu den Kernaufgaben der Arbeitsgruppe 1.72 *Angewandte Akustik* gehört die Sicherstellung der Einheitlichkeit im bauakustischen Messwesen. Dies betrifft sowohl Messungen von Bauteilen in Prüfständen als auch Messungen des Schallschutzes in ausgeführten Gebäuden. Prüfstandsmessungen werden von Stellen durchgeführt, die vom Deutschen Institut für Bautechnik zur Erteilung allgemeiner bauaufsichtlicher Prüfzeugnisse (abP) zugelassen wurden. Für diese Prüfstellen wurden im vergangenen Jahr Vergleichsmessungen in der PTB durchgeführt, an denen neben sechs abP-Prüfstellen weitere sechs Laboratorien auf freiwilliger Basis teilnahmen. Die Ergebnisse aller Teilnehmer stimmten im Rahmen der zulässigen Abweichungen mit den PTB-Ergebnissen sehr gut überein.

Messungen in ausgeführten Gebäuden können von Schallschutzprüfstellen durchgeführt werden, die über eine Anerkennung vom Verband der Materialprüfungsanstalten e.V. (VMPA) verfügen. Voraussetzung für die Anerkennung ist u. a. die erfolgreiche Teilnahme an bauakustischen Vergleichsmessungen, die vom VMPA in Kooperation mit der PTB organisiert werden. Im Berichtszeitraum endete ein Vergleichsmessungszyklus, an dem innerhalb von drei Jahren 83

Prüfstellen teilnahmen. Auch hier zeigte sich eine insgesamt sehr gute Übereinstimmung zwischen den Ergebnissen der Prüfstellen und den PTB-Referenzwerten (Bild 12).

Beide Vergleichsmessungen dienen auch der regelmäßigen Prüfung der bauakustischen Schallquellen, der Erprobung neuer Messverfahren, der Verifizierung und Ermittlung von Messunsicherheiten sowie dem Erfahrungsaustausch zwischen den Prüfstellen. Damit tragen sie wesentlich zum hohen Niveau der bauakustischen Messtechnik in der Bundesrepublik bei.

Für den Fachbereich 1.3 *Geschwindigkeit* brachte das Jahr 2016 viele erfreuliche Entwicklungen. Nach langen Verzögerungen bei der Sanierung stehen wieder zwei Schießkanäle zur Verfügung. Damit können die vielfältigen Aufgaben der PTB nach dem deutschen Waffenrecht, z. B. die Bestimmung der Geschossgeschwindigkeit von zivilen Waffen (z. B. Paintball-Gewehren), die Prüfung der Handhabungssicherheit von pulvergetriebenen Werkzeugen (z. B. Bolzensetzgeräten) und Schussapparaten oder die Messung des dynamischen Gasdruckes beim Abfeuern von Patronen- oder Kartuschenmunition, nun in einer Messumgebung bearbeitet werden, die den modernen technischen und aktuellen arbeitssicherheitsmäßigen Anforderungen entspricht. Mittlerweile konnte ein Auftragsrückstau aus zwei Jahren Bauarbeiten abgearbeitet und der normale Bearbeitungsfluss wieder hergestellt werden. So kann die PTB wieder zeitnah ihren Beitrag dazu leisten, dass gesetzliche Bestimmungen zum Schutz des Anwenders technisch eingehalten werden. Insbesondere konnte der große Auftragsschub bei der



Bild 13: Einer der renovierten Schießkanäle

Prüfung von Schreckschusswaffen, der infolge der Vorfälle der Kölner Silvesternacht 2015/2016 zu beobachten war, gut bewältigt werden.

Unter das Thema Anwendersicherheit fällt auch ein Forschungsprojekt, welches gemeinsam mit der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung und anderen Partnern durchgeführt wird. Dabei wird untersucht, ob von Nägeln, die bei schiefer, also unsachgemäßem Aufsetzen eines Bolzensetzgerätes vom Werkstück abprallen, ein Verletzungspotenzial ausgeht. Die Bestimmung der Bewegungsenergie der Nägel mithilfe einer Hochgeschwindigkeitskamera zeigt, dass nur relativ wenig Energie durch das Abprallen verloren geht, sodass weitere Betrachtungen zur Sicherheit des Bedieners und der Umstehenden sinnvoll sind.

Auch der andere Teil des Fachbereiches 1.3, der sich mit der Sicherstellung der Messrichtigkeit bei der amtlichen Verkehrsüberwachung befasst, kann auf ein gutes Jahr 2016 zurückblicken. Neben der seit Jahrzehnten betriebenen Prüfung von Baumustern neuartiger Verkehrsüberwachungsgeräte stellt der Fachbereich eine wichtige Infrastrukturleistung besonderer Art für die Gesellschaft bereit, nämlich die Beratung im Sinne von Obergutachten zu technischen Fragen der Verkehrsüberwachung. Zwar verharrt die Flut an Anfragen deutscher Verkehrsgerichte weiter auf dem hohen Niveau von mehreren Hundert pro Jahr. Allerdings wurde Anfang des Jahres unter der leicht zu merkenden Web-Adresse [http://www.ptb.de/geschwindigkeit\\_stellungnahmen](http://www.ptb.de/geschwindigkeit_stellungnahmen) eine neue Seite eingerichtet, auf der in allgemeinverständlicher Sprache Stellungnahmen der PTB zu häufiger auftretenden technischen Fragen bei Verkehrsmessgeräten gesammelt werden. Nicht nur Hunderte von Zugriffen pro Monat belegen den Erfolg dieser Maßnahme. Denn waren bisher schon die Bauartzulassungen bzw. Konformitätsbewertungen durch die PTB als „antizipierte Sachverständigenurkunden“ durch die Oberlandesgerichte anerkannt worden, gelten nach einer Entscheidung des OLG Frankfurt vom 26.8.2016 (2 Ss-OWi 589/16) nun auch die auf der Webseite hinterlegten generellen Stellungnahmen und Bewertungen als „Gutachten einer Behörde“ (§ 256 Abs. 1 Nr. 1a StPO), die in Gerichtsverfahren zu Verkehrsordnungswidrigkeiten als Urkundsbeweis verlesen werden können, ohne dass Mitarbeiter der PTB jeweils in die Hauptverhandlungen geladen werden müssen. Damit besteht die Hoffnung, dass die Zahl der Anfragen von Gerichten mittelfristig auf ein leichter zu handhabendes Maß zurückgeht.

Gut angenommen wird auch das Angebot der PTB, Schulungen für Richter und Staatsanwaltschaften zu technischen Fragen der Verkehrsüberwachung

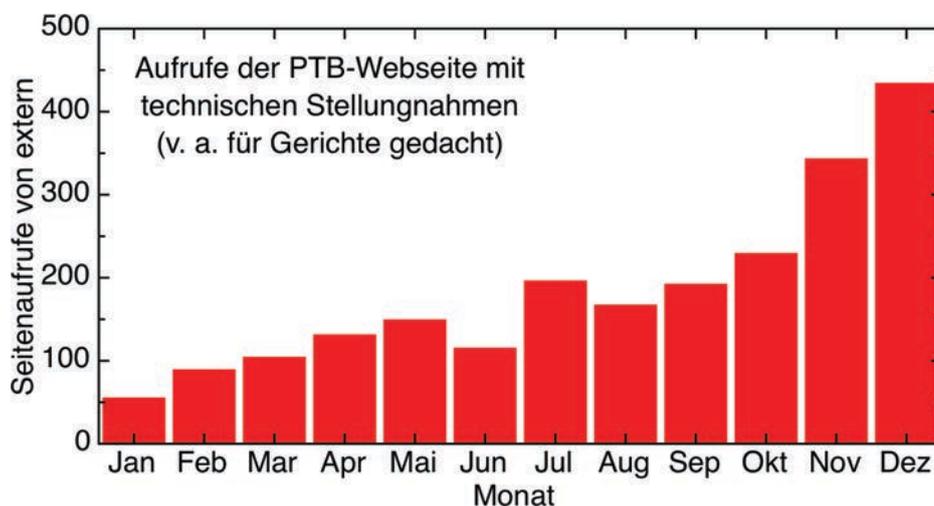


Bild 14: Externe Zugriffe auf die neue Webseite mit Stellungnahmen der PTB zu technischen Fragen der Verkehrsüberwachung

durchzuführen. Mit der Darstellung der großen Schärfe und Tiefe der Bauartprüfungen der PTB für neue Verkehrsmessgeräte kann so verdeutlicht werden, warum in Deutschland z. B. niemand befürchten muss, wegen einer falschen Messung zu Unrecht des Rasens beschuldigt zu werden.

In diesem Zusammenhang steht auch eine Forschungskoooperation mit dem Lehrstuhl für Ergonomie der TU München. Mit einem geeichten Messgerät wurde im Rahmen einer Doktorarbeit versucht, unter bewusster Missachtung der Gebrauchsanweisung, z. B. durch schiefe Aufstellung, Fehlmessungen im realen Straßenverkehr zu provozieren. Das gelang nicht! Durch Vergleich mit den gleichzeitig erfolgenden Messungen durch die PTB-Referenzanlage konnte gezeigt werden, dass das Messgerät selbst unter extremer Schiefstellung keinen einzigen unzulässigen Messwert produzierte. Diese Untersuchung bestätigt gleichzeitig, dass das Messgerät zuverlässig in der Lage ist, mögliche Fehlmessungen durch den von Sachverständigen in Ordnungswidrigkeitsverfahren immer wieder angeführten Stufeneffekt zu vermeiden.

[1] M. Kobusch, „Analysis of impact hammer calibration measurements“, 9<sup>th</sup> International Workshop on Analysis of Dynamic Measurements, Nov. 9–10, 2016, Berlin.

[2] Th. Bruns, S. Gazioch, „Correction of shaker flatness deviations in very low frequency primary accelerometer calibration“, *Metrologia* 53 (2016) 986–990, doi:10.1088/0026-1394/53/3/986

## In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

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

### Grundlagen der Metrologie

#### Neuer <sup>28</sup>Si-Einkristall für das Avogadro-Projekt der PTB

Die PTB will nach der für 2018 erwarteten Neudefinition die Masseinheit Kilogramm mithilfe von Silizium-Kugeln darstellen. Nachdem im März 2015 der erste Einkristall aus Isotopen-angereichertem Silizium für die PTB fertiggestellt worden war (s. PTB-News 2015 Heft 1, PTB Jahresbericht 2015), ist am 1. Juni 2016 der zweite Einkristall in der PTB eingetroffen. (H. Bettin, FB 1.8, [horst.bettin@ptb.de](mailto:horst.bettin@ptb.de))

#### Stabilitätsuntersuchungen zum Transfer und zur Lagerung von Massenormalen unter Schutzgas

Transport und Lagerung von Massenormalen unter Schutzgas führte zu keiner Verbesserung der Massestabilität. Die Stabilität eines Massenormalen bestimmt, in welchen Intervallen eine Rekalibrierung des Normalen erforderlich ist und wie genau, z. B. im Rahmen von internationalen Vergleichsmessungen, Ergebnisse von Massebestimmungen miteinander verglichen werden können. (M. Borys, M. Mecke, FB 1.8, [michael.borys@ptb.de](mailto:michael.borys@ptb.de))

#### Kontrolle der Transportbedingungen bei Ringvergleichen mithilfe eines Datenloggers

Im Rahmen des BIPM-Ringvergleichs CCAUV.U-K3.1 wurde ein Ultraschallwandler als Messartefakt zwischen den sechs teilnehmenden NMIs verschickt. Dabei wurden während der Transporte Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Luftdruck und Beschleunigung mit einem Datenlogger überwacht. Aus den so gewonnenen Daten über die Transportbedingungen können klare Empfehlungen über die Benutzung unterschiedlicher Transportmittel (Flugzeug, Bahn,...) und -arten (Kurierdienst, persönliche Begleitung,...) abgeleitet werden. (J. Haller, FB 1.6, [julian.haller@ptb.de](mailto:julian.haller@ptb.de))

#### EMRP-Projekt SIB52 „Thermo“: Metrologie für Hochtemperatur-Wärmedämmstoffe

Jüngste Entwicklungen von Hochtemperatur-Wärmedämmstoffen auf Basis von Polymer-, Aerogel- und Faser-Verbundwerkstoffen zeigen deren Potenzial, eine deutlich bessere Wärmedämmung zu ermöglichen als herkömmliche Materialien. Allerdings fehlt bislang ein zuverlässiger metrologischer Rahmen, um ihr thermisches Leistungsvermögen (inklusive ihrer Brandschutztauglichkeit) zu bewer-

ten: Untersuchungen mit industriellen Messgeräten zeigen gegenseitige Abweichungen von teils über 100 % für die neuartigen Wärmedämmstoffe, und selbst die Messergebnisse von Referenzlaboratorien weichen um bis zu 15 % voneinander ab. Mithilfe des EMRP-Forschungsprojektes „Thermo“ soll eine Infrastruktur geschaffen werden, die vollständig rückführbare Wärmeleitfähigkeitsmessungen bei Temperaturen bis zu 650 °C erlaubt. Das Projekt wurde im Juni 2013 begonnen und endete im Mai 2016. Beteiligt waren die fünf europäischen Metrologie-Institute NPL (National Physical Laboratory, Großbritannien), CMI (Český Metrologický Institut, Tschechien), LNE (Laboratoire national de métrologie et d'essais, Frankreich), MKEH (Magyar Kereskedelmi Engedélyezési Hivatal, Ungarn) und PTB (Arbeitsgruppe 1.01). (U. Hammerschmidt, SeSc 1.01, E-Mail: [ulf.hammerschmidt@ptb.de](mailto:ulf.hammerschmidt@ptb.de))

#### Neue, präzise Modellgleichung für den Düsenbeiwert kritischer Düsen im Hoch- und Niederdruck

Für die Darstellung des Düsenbeiwertes (discharge coefficient)  $c_D$  einer kritisch betriebenen Venturidüse als Funktion der Reynoldszahl wurde eine neue Modellgleichung erstellt, die zum ersten Mal eine feste Relation des Messverhaltens bei hohen und niedrigen Drücken widerspiegelt und Realgaseffekte berücksichtigt. (B. Mickan, FB 1.4, [bodo.mickan@ptb.de](mailto:bodo.mickan@ptb.de))

#### Kavitation metrologisch nutzen – Innovative Durchflusserzeugung von Flüssigkeitsströmen mittels spezieller Kavitationsdüsen

Im Fachbereich *Flüssigkeiten* wird seit Kurzem ein neues Verfahren zur Generierung konstanter reproduzierbarer Flüssigkeitsdurchflüsse mittels sogenannter Kavitationsdüsen erprobt. Im Rahmen der Optimierung der Düsengeometrie für diesen speziellen Anwendungsfall wurden unter anderem auch Aufnahmen mit einer Hochgeschwindigkeitskamera gemacht, die interessante Einblicke in das Verhalten einer kavitierenden Düsenströmung ermöglichen und erfolgreich für die Verifizierung von CFD-Simulationen genutzt werden konnten. (D. Schumann, FB 1.5, [daniel.schumann@ptb.de](mailto:daniel.schumann@ptb.de))

### **Untersuchungen zum Temperatur- und Feuchteinfluss auf die Drehmomentmessung veröffentlicht**

Der Einfluss einer veränderlichen Temperatur auf die Messung verschiedener Größen ist allgemein bekannt. Doch auch die relative Luftfeuchtigkeit kann eine Rolle spielen. Die Wirkung beider Größen auf die Messergebnisse wurde für Drehmomentaufnehmer, Messverstärker und Brückennormale für die Verstärkerkalibrierung untersucht und veröffentlicht. (D. Röske, FB 1.2, dirk.roeske@ptb.de)

### **Software-Werkzeuge für die Berechnung von Messunsicherheiten bei der Kraftmessung**

Im Rahmen des Projekts SIB63 „Force traceability within the meganewton range“ des Europäischen Metrologie-Forschungsprogramms EMRP wurden Software-Werkzeuge für die Berücksichtigung verschiedener Einflussgrößen auf die Kraftmessung sowie für die Berechnung der korrigierten Ergebnisse und der beigeordneten Messunsicherheiten entwickelt und den Anwendern online zur Verfügung gestellt (D. Röske, FB 1.2, dirk.roeske@ptb.de)

### **Erweiterung des Frequenzbereiches des PTB-Schallnormals bis herunter zu 2 Hz für die Rückführung akustischer Messungen im Infraschallbereich**

Die Darstellung der Schalldruckeinheit durch die Kalibrierung von Laboratoriums-Normalmikrofonen nach dem Reziprozitätsverfahren in der Druckkammer ist durch die damit zu erreichende geringe Messunsicherheit in der Größenordnung von wenigen hundertstel Dezibel die wichtigste Grundlage für die Rückführung bei akustischen Messungen. Bislang erfolgte diese Kalibrierung im Hörfrequenzbereich von 32 Hz bis 10 kHz. Kürzlich wurde in der PTB der Frequenzbereich bis zu 2 Hz herunter erweitert, was die immer stärker nachgefragte Rückführung für Schallmessungen im Infraschallbereich zukünftig ermöglichen wird. Ein EURAMET-Ringvergleich, der diesen Frequenzbereich umfasst, steht kurz vor dem Abschluss. (T. Fedtke, FB 1.6, thomas.fedtke@ptb.de)

### **Metrologie für die Wirtschaft**

#### **PTB-Kalibrierservice für Luftultraschall**

Trotz der weiten Verbreitung von Ultraschalltechnik in allen Bereich des täglichen Lebens war es bisher nicht möglich, den Schalldruckpegel im Ultraschallbereich über 20 kHz metrologisch gesichert zu messen. Im gemeinsamen EMRP-Projekt EARS wurde vor Kurzem am dänischen Metrologieinstitut (DFM) ein Primärnormal für Luftultraschall entwi-

ckelt. Die daraus erhaltenen speziellen primären Referenzmikrofone werden nun in der PTB in einem neuen Sekundärverfahren eingesetzt, um beliebige Ultraschallmikrofone bis zu einer Frequenz von 100 kHz zu kalibrieren. Mit dem neuen Kalibrierservice können Industrie und Forschung erstmals ihre Luftultraschallmessungen auf eine fundierte metrologische Basis stellen. (C. Kling, FB 1.6, christoph.kling@ptb.de)

### **Laser-Doppler-Profilsensor zur hochaufgelösten Messung von Strömungsgeschwindigkeitsprofilen**

Die Arbeitsgruppe *Strömungsmesstechnik* hat Mitte 2016 ein zweijähriges ZIM-Projekt, das in Kooperation mit der TU Dresden und den Firmen ILA GmbH und OPTOLUTION Messtechnik GmbH bearbeitet wurde, erfolgreich abgeschlossen. Ziel des Projektes war die „Entwicklung von Sensorvarianten zur simultanen hochaufgelösten Orts- und Geschwindigkeitsmessung (Profilsensoren) für Laser-Doppler-Velozimeter (LDV)“, wobei die Aufgabe der PTB in der Entwicklung eines industrietauglichen, kostengünstigen und leicht zu adaptierenden Nachrüst-Sensormoduls – inklusive der erforderlichen Signalverarbeitung – bestand. Neben den funktionalen Gesichtspunkten stand dabei die flexible Einsatzmöglichkeit und einfache Integration des Nachrüstmoduls in bereits bestehende Kreuzstrahl-LDV im Vordergrund. (S. Oertel, FB 1.4, stefan.oertel@ptb.de)

### **Robuste Membranhydrophone für die Messung hochintensiver therapeutischer Ultraschallfelder**

In der AG 1.62 *Ultraschall* der PTB wurden in Kooperation mit der Gesellschaft für Angewandte Medizinische Physik und Technik (GAMPT) mbH, Merseburg, besonders robuste piezoelektrische Membranhydrophone zur Messung extremer Schallwechseldruckverläufe zur Marktreife entwickelt. (V Wilkens, FB 1.6, volker.wilkens@ptb.de)

### **Normkonforme Verfahren zur 3D-Lochbildeinpassung in der Koordinatenmesstechnik**

Die PTB untersucht in Kooperation mit einer Herstellerfirma für industrielle Mehrkoordinatenmesssysteme geeignete Verfahren für die rechnerische Montagesimulation mit 3D-Lochbildeinpassung. Diese kann beispielsweise zum Prüfen von Flanschverbindungen bei Windkraftanlagen eingesetzt werden. Das Vorhaben wird durch das BMWi im Rahmen des Forschungsprojekts „3D-Lochbildeinpassung für Koordinatenmesssysteme mit taktilen und optischen Sensoren sowie CT-Systemen“ gefördert. Die Arbeiten haben im April 2015 be-

gonnen und sind auf 2,5 Jahre begrenzt. Ziel ist es, zum Projektende neue Verfahren bereitzustellen, die den stetig wachsenden Anforderungen bei der Auswertung optischer und CT Messdaten gewachsen sind. Ferner wird es Entwicklern und Nutzern der 3D-Lochbildeinpassung erstmals möglich sein, die Rechengenauigkeit ihrer Softwareergebnisse zu quantifizieren. Auf lange Sicht kann hierdurch die Qualität von Produkten in vielseitigen industriellen Bereichen wie der Automobilindustrie, Mikroelektronik und Medizintechnik nachhaltig verbessert werden. (D. Hutzschenreuter, FB 1.1, daniel.hutzschenreuter@ptb.de)

### **Erfolgreiche Wiederinbetriebnahme des Mineralölzählerprüfstandes**

Der Mineralölzählerprüfstand (kurz: MÖZ) gehört zu den beiden am Fachbereich 1.5 betriebenen großtechnischen Flüssigkeits-Prüfanlagen. Die zentrale Aufgabe des MÖZ besteht in der Darstellung der Einheiten Volumen und Volumendurchfluss für Prüfmedien auf Mineralölbasis. Im Zuge aktueller Arbeiten zum Re-Engineering wurden die vorhandenen vier Normalbehälter neu kalibriert. Zusätzlich wurde die bisherige Prüfflüssigkeit (12 500 Liter) gegen ein Testbenzin ausgetauscht, das deutlich reduzierte gesundheits- und sicherheitsrelevante Gefährdungsklassen besitzt. In Kombination mit weiteren Wartungsarbeiten konnte der MÖZ wieder erfolgreich in Betrieb genommen werden. (E. Frahm, FB 1.5, enrico.frahm@ptb.de)

### **Neuartiges Brückennormal ermöglicht zukünftig verbesserte dynamische Kalibrierung von Brückenverstärkern**

Die Arbeitsgruppe 1.73 *Stoßdynamik* hat ein in der Arbeitsgruppe 2.12 *Verhältnismessungen, Abtastverfahren* der PTB entwickeltes und kalibriertes dynamisches Brückennormal erhalten, das Basis für einen Messaufbau zur dynamischen Kalibrierung von Brückenverstärkern sein wird. Diese Kalibrierungen sollen zukünftig als Dienstleistung angeboten werden. (L. Klaus, FB 1.7, leonard.klaus@ptb.de)

### **Metrologie für die Gesellschaft**

#### **Falsch aufgestellt und doch korrekt geblitzt!**

Sie wurden in der Zone 30 mit 97 km/h geblitzt und haben nun Sorge, dass es durch die besondere Karosserieform Ihres „Neunelfers“ oder durch eine fehlerhafte Aufstellung des „Blitzers“ zu einer unzulässigen Messwertabweichung gekommen sein könnte? Keine Sorge. Lehnen Sie sich entspannt zurück! Die Messung stimmt! Im Rahmen einer Forschungskooperation mit der TU München wurden

nämlich für einen „Blitzer“, der nach dem Laser-scanner-Prinzip funktioniert, die Auswirkungen von Fehlauflösungen untersucht, also wenn z. B. das Gerät schief aufgestellt wird. Damit werden gleichzeitig Rückschlüsse auf den sogenannten Porsche-Effekt möglich, also Abtasteffekte des Laserstrahles, die auch als Stufen- und Abgleiteneffekte an der Fahrzeugkarosserie bezeichnet werden. Hierzu wurde das geeichte Messgerät an einer öffentlichen Straße, den Vorgaben der Gebrauchsanweisung bewusst widersprechend, betrieben. Während der Versuchsdurchführung wurden die Messwerte des Laserscanner-Geschwindigkeitsmessgerätes mit den Messwerten der PTB-Referenzanlage verglichen. Die Auswertung der Untersuchung zeigte zweifelsfrei, dass die von Gutachtern in Publikationen geäußerte Befürchtung, wonach der Porsche-Effekt zu unzulässigen Messwertabweichungen führt, unbegründet ist. (F. Märtens, FB 1.3, frank.maertens@ptb.de)

#### **Renovierte Schießkanäle in Dienst gestellt**

Zu den zahlreichen Aufgaben im Sinne der Anwersicherheit, die das Waffenrecht der PTB zuweist, gehören die Bestimmung von Geschossgeschwindigkeiten und von dynamischen Gasdrücken beim Abfeuern von Patronen- und Kartuschenmunition. Die dafür genutzten beiden Schießkanäle waren sanierungsbedürftig und entsprachen nicht mehr in allen Punkten den aktuellen Sicherheitsvorschriften. Nach langwierigen Bauarbeiten stehen die vollständig modernisierten Schießkanäle für diese Prüfungen wieder zur Verfügung. Damit können Kundenaufträge nun mit der erforderlichen Effizienz bearbeitet werden. (O. Slanina, FB 1.3, oliver.slanina@ptb.de)

#### **Informationswebseite für Gerichte und Sachverständige**

Seit Jahrzehnten prüft die PTB die Bauart von neuen „Blitzern“, Rotlichtüberwachungsanlagen und anderen Verkehrsmessgeräten, bevor sie eingesetzt werden dürfen. So ist sichergestellt, dass z. B. niemand wegen einer falschen Messung zu Unrecht des Rasens beschuldigt wird. Wegen ihrer Kompetenz und ihrer Neutralität wird die PTB insbesondere von Gerichten gerne um Stellungnahmen gebeten, wenn z. B. ein Raser die gefahrene Geschwindigkeit mit Hinweis auf angebliche technische Unzulänglichkeiten des Messgerätes bestreitet. Um der Flut der mehreren hundert Anfragen im Jahr besser gerecht zu werden, hat die PTB nun eine spezielle Webseite eingerichtet, auf der sie Stellungnahmen zu häufiger auftretenden Fragen dauerhaft sammelt: [http://www.ptb.de/geschwindigkeit\\_stellungnahmen](http://www.ptb.de/geschwindigkeit_stellungnahmen). Nicht nur

dreistellige Zugriffszahlen pro Monat belegen den Erfolg dieser Maßnahme, sondern auch die kürzlich erfolgte Anerkennung der dort abgelegten Dokumente als „Gutachten einer Behörde“, die in Gerichtsverfahren zu Verkehrsordnungswidrigkeiten verlesen werden dürfen, statt PTB-Mitarbeiter zur Hauptverhandlung zu laden (Urteil des OLG Frankfurt vom 26.08.2016, Nr. 2 Ss-OWi 589/16). (R. Wynands, FB 1.3, robert.wynands@ptb.de)

### **Alternative Trittschallquellen bilden menschlichen Geher gut ab**

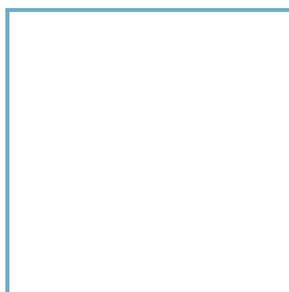
Zahlreiche Untersuchungen aus der Vergangenheit zeigen, dass das Trittschall-Normhammerwerk die Quelleigenschaften eines menschlichen Gehers ungenügend nachbildet. Die entsprechende Messnorm schlägt daher alternative Quellen vor, deren Eigenschaften in der PTB untersucht wurden. Es konnte gezeigt werden, dass die alternativen vibroakustischen Quellen den menschlichen Geher gut annähern. (H. Bietz, FB 1.7, heinrich.bietz@ptb.de)

### **Internationale Angelegenheiten**

#### **Abschluss von CCM-Vergleichsmessungen für Teile und Vielfache des Kilogramm (CCM.M-K7)**

Die Unsicherheitsangaben für die Weitergabe der Masseneinheit Kilogramm wurden im Rahmen internationaler Vergleichsmessungen bestätigt. (M. Borys, FB 1.8, michael.borys@ptb.de)

# Abteilung 2 Elektrizität



Elektrische Größen treten in nahezu allen Bereichen des Messwesens auf. Aufgabe der Abteilung *Elektrizität* ist die Darstellung und Weitergabe sämtlicher elektrischer und magnetischer Einheiten. Die Arbeiten umfassen die Untersuchung metrologisch relevanter Prozesse in Festkörper-Nanoschaltungen, die Entwicklung von elektrischen Quanten-, Primär- und Transfernormalen sowie Kalibrier- und Prüfdienstleistungen. Durch Beratungsaktivitäten, die Mitarbeit in Normungs- und sonstigen Gremien sowie durch Technologietransferprojekte unterstützt die Abteilung die deutsche Wirtschaft und trägt zur Einheitlichkeit des Messwesens bei.

Organisatorisch ist die Abteilung in sechs Fachbereiche gegliedert: *Gleichstrom und Niederfrequenz, Hochfrequenz und Felder, Elektrische Energiemess-technik, Quantenelektronik, Halbleiterphysik und Magnetismus* sowie *Elektrische Quantenmetrologie*. Teilweise über Fachbereichsgrenzen hinweg wurden die fünf Schwerpunktthemen *Grundlagen der elektrischen Metrologie, Aufbau von Quanten- und klassischen Skalen für elektrische und magnetische Einheiten, Elektrische Energiemesstechnik, Hochfrequenz- und Terahertz-Metrologie* sowie *Metrologie für magnetische Nanostrukturen* als mittelfristig wichtigste Arbeitsfelder identifiziert.

In allen Bereichen wurden im Berichtsjahr Dienstleistungen in gewohnter Qualität und gewohntem Umfang erbracht. Etwa 99 % der Kalibrierdienstleistungen können mit Verweis auf das „Mutual Recognition Arrangement“ der Meterkonvention (CIPM-MRA) angeboten werden. Dadurch wird die vom Großteil der Kunden gewünschte internationale Anerkennung der Kalibrierungen gewährleistet. Zur Förderung des Dialogs mit den Kunden, insbesondere den akkreditierten Kalibrierlaboratorien, wurde auch im Jahr 2016 ein PTB Seminar angeboten. In dem Seminar wurden Neuerungen auf dem Gebiet der elektrischen Messtechnik und der Kalibrierung elektrischer Größen vorgestellt. Die Abteilung arbeitet darüber hinaus eng mit den Fachausschüssen des Deutschen Kalibrierdienstes (DKD) zusammen.

Die Forschungsarbeiten der Abteilung werden in vielen Fällen in enger Kooperation mit anderen nationalen Metrologieinstituten durchgeführt. Hierzu beteiligt sich die Abteilung an dem von der EU geförderten European Metrology Research Pro-

gramme (EMRP) bzw. dem Nachfolgeprogramm EMPIR (European Metrology Programme for Innovation and Research). Die Programme werden unter strategischen Gesichtspunkten zur Stärkung der o. g. Schwerpunktthemen genutzt. Im Berichtszeitraum sind die dreijährigen Projekte der EMRP-Förderlinien „SI Broader Scope II, Industry II“ und „Open Excellence“ erfolgreich abgeschlossen worden. Die Abteilung war in den drei Förderlinien an sieben Projekten maßgeblich beteiligt und hat fünf dieser sieben Projekte koordiniert. Der inhaltliche Schwerpunkt lag auf Projekten der Förderlinie „SI Broader Scope II“, die das Ziel hatten, Quantentechnologien, wie die Josephson- und Quanten-Hall-Messtechnik, praxistauglicher zu machen und einem größeren Nutzerkreis zur Verfügung zu stellen.

Im Bereich der Nachwuchsförderung kooperiert die Abteilung intensiv mit der Technischen Universität Braunschweig (TU BS) und der Leibniz Universität Hannover. Im mit der TU BS gemeinsam eingeworbenen DFG-Graduiertenkolleg „Metrology for Complex Nanosystems“ (Nanomet) wurde im Berichtszeitraum erfolgreich an zwei Promotionsvorhaben gearbeitet. Insgesamt werden in der Abteilung etwa zwanzig Promotionsvorhaben bearbeitet, größtenteils in Kooperation mit der TU BS und der Leibniz Universität.

Als wichtige Infrastrukturmaßnahme wurde in der Abteilung *Elektrizität* im Berichtsjahr ein Heliumverflüssiger in Betrieb genommen (siehe Titelseite des Abteilungsberichts). Die Anlage wurde in einem neu errichteten Gebäude installiert und versorgt den gesamten PTB-Standort Braunschweig mit Flüssighelium. Beim bis zum Jahr 2015 praktizierten Einkauf von Flüssighelium war es in den letzten Jahren immer wieder zu Lieferengpässen gekommen. Die neu installierte Anlage deckt jetzt verlässlich den Bedarf der Forschung, Entwicklung und Anwendung von elektrischen Quantennormalen. Von der höheren Versorgungssicherheit mit Flüssighelium profitieren auch andere Arbeitsgebiete der PTB.

Nach diesem allgemeinen Überblick werden im Folgenden die im Jahr 2016 erzielten Fortschritte in den fünf Schwerpunktgebieten dargestellt.

### Grundlagen der elektrischen Metrologie

Im neuen Internationalen Einheitensystem, dem SI, wird voraussichtlich ab dem Jahr 2018 die Stromstärkeeinheit Ampere über den Wert der Elementarladung  $e$  definiert. Für die direkte Realisierung dieser Definition treibt man einzelne Elektronen

Titelbild:

Der neue Heliumverflüssiger (links) und die Helium-Abfüllstation mit 4000-Liter Speichertank

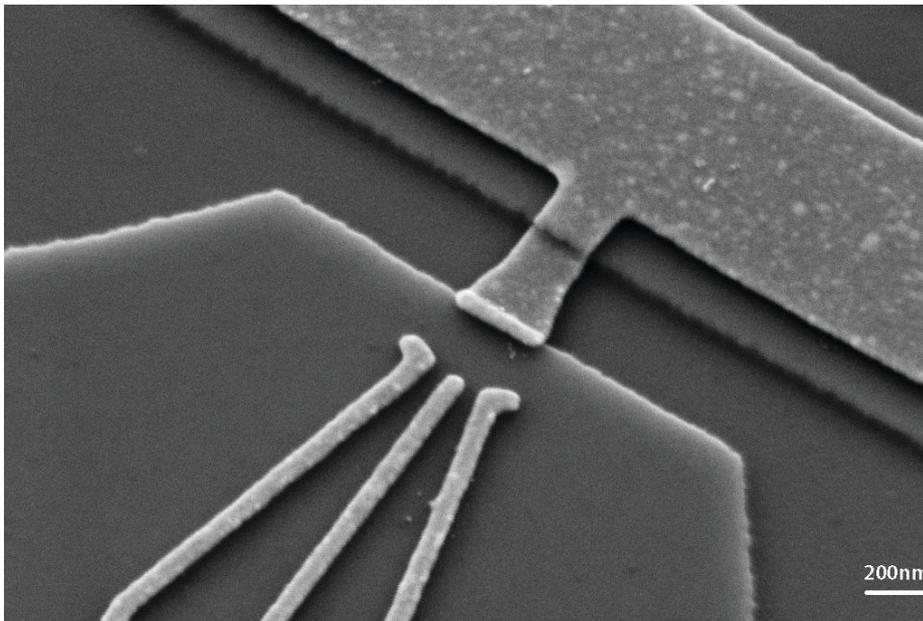


Bild 1: GaAs-Quantenpunkt als Halbleiter-Einzelelektronendetektor

durch eine extrem schmale Leiterbahn mit Dimensionen im Nanometerbereich. In der Abteilung *Elektrizität* wurden in den letzten Jahren solche als Einzelelektronenpumpen bezeichnete Bauelemente auf der Basis von Halbleitermaterialien entwickelt. Betreibt man solche Pumpen bei einer Taktfrequenz  $f$ , erwartet man, dass ein Strom der Stärke  $I = e \cdot f$  erzeugt wird. Im Berichtsjahr konnte gezeigt werden, dass ein solcher quantisierter Strom aus einer Halbleiter-Einzelelektronenpumpe innerhalb einer Messunsicherheit von  $0,16 \mu\text{A/A}$  mit dem erwarteten Wert übereinstimmt. Dieses Ergebnis stellt eine neue Rekordmarke dar und bestätigt frühere Mes-

sungen mit einer Messunsicherheit von  $0,20 \mu\text{A/A}$ . Die Verringerung der Messunsicherheit wurde durch die sorgfältige Optimierung des Messaufbaus erzielt. Der Aufbau besteht aus einem speziellen, an der PTB entwickelten Transimpedanzverstärker, der auf einen Quanten-Hall-Widerstand rückgeführt ist, und einem Josephson-Quantenvoltmeter. Mit diesen Arbeiten ist der Nachweis gelungen, dass das „Quanten-Ampere“ des neuen SI mit einer geringeren Messunsicherheit dargestellt werden kann als das klassische Ampere im heutigen SI (siehe auch die Rubrik „Nachrichten des Jahres“).

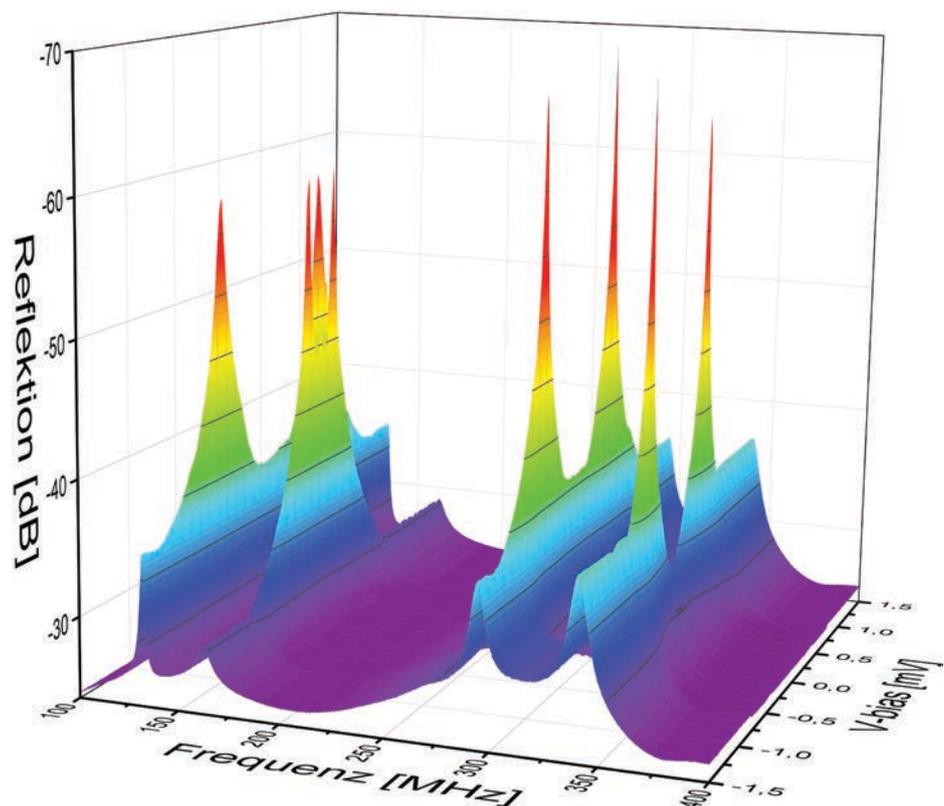


Bild 2: Auslesen von vier RF-SET-Detektoren mit dem Verfahren des Frequenzmultiplexing

Zur weiteren Verbesserung der Darstellung des Quanten-Amperes entwickelt die Abteilung sogenannte selbstreferenzierte Quantenstromquellen. Diese Quantenschaltungen bestehen aus in Serie geschalteten Halbleiter-Einzelektronenpumpen und Einzelektronendetektoren. Die Detektoren messen Fehlereignisse. Werden diese bei der Bestimmung des Stroms berücksichtigt, kann mit der Serienschaltung eine kleinere Unsicherheit erreicht werden als mit einer einzelnen Einzelektronenpumpe. Die Unsicherheit der Serienschaltung lässt sich durch die Verwendung breitbandiger Einzelektronendetektoren (RF-SET-Detektoren) und Halbleiterpumpen mit geringer Fehlerrate verringern. Die Fehlerrate kann durch das Anlegen eines Magnetfeldes verringert werden. Im Berichtsjahr konnte experimentell gezeigt werden, dass sich Quantenschaltungen aus Halbleiter-Einzelektronenpumpen und Halbleiter-Einzelektronendetektoren (s. Bild 1) in einem Magnetfeld betreiben lassen. Eine solche Quantenschaltung stellt einen vielversprechenden Baustein einer selbstreferenzierten Quantenstromquelle dar. Auch bei dem RF-SET-Detektionsverfahren wurde ein wichtiger Fortschritt erzielt: Das Verfahren des Frequenzmultiplexings zum vereinfachten Auslesen mehrerer RF-SET-Detektoren konnte experimentell demonstriert werden (siehe Bild 2).

Für den zuverlässigen Betrieb von Einzelektronenschaltungen ist die Unterdrückung des durch Mikrowellenphotonen verursachten Ladungsrauschens von entscheidender Bedeutung. Zu diesem Zweck wurde ein Mikrowellenfilter auf Basis einer Reihenschaltung von SQUIDs (Superconducting Quantum Interference Devices) entwickelt, mit dem sich variable, frequenzabhängige Unterdrückungsfaktoren bis zu  $10^4$  im Frequenzbereich von 100 GHz bis 200 GHz realisieren lassen (siehe Bild 3).

Die Untersuchung von Quantenschaltungen erfordert häufig neben hochempfindlichen Detektoren rauscharme Verstärker. Daher wurde im Berichtszeitraum das Konzept für einen parametrischen Wanderwellen-Verstärker entwickelt, der die Dreiwellenmischung ausnutzt. Dieses Verstärkerkonzept verspricht neben einer hohen Verstärkung und einem geringen Rauschen am Quantenlimit auch eine große Bandbreite. Als nichtlineares Element dient eine Reihenschaltung von Einzelkontakt-SQUIDs. Eine Testschaltung wurde in Niob-Technologie mit Nb/ $\text{AlO}_x$ /Nb-Josephson-Kontakten realisiert. Die ersten experimentellen Ergebnisse sind vielversprechend.

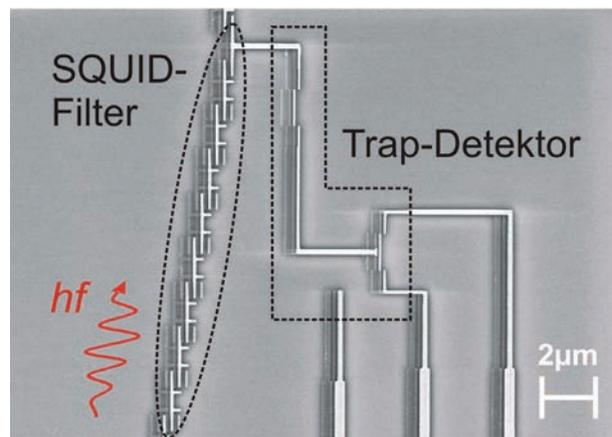


Bild 3: Rasterelektronen-Mikroskop-Bild einer SQUID-Reihenschaltung, die als Mikrowellenfilter dient, und einer Einzelektronenfalle („Trap“), mit deren Hilfe sich Mikrowellen-Photonen nachweisen lassen

## Aufbau von Quanten- und klassischen Einheitenskalen

Die Industrie benötigt Kalibrierungen elektrischer Messgeräte in sich ständig erweiternden Werte- und Frequenzbereichen. Daher baut die Abteilung diese Bereiche kontinuierlich aus. Dabei sollen vermehrt Quantennormale eingesetzt werden, um Kalibrierketten zu verkürzen und die Kosten für Kalibrierungen zu senken. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Nutzung von Josephson-Spannungsnormalen und Quanten-Hall-Widerstandsnormalen.

Pulsgetriebene Josephson-Spannungsnormale bilden die Quantenbasis der Messung von Wechselspannungsgrößen, da mit ihnen spektral reine Sinusspannungen erzeugt werden können. Nachdem im Vorjahr die Ausgangsspannung eines pulsgetriebenen Josephson-Spannungsnormals durch die dreifache Stapelung von Josephson-Kontakten und durch die Serienschaltung von acht Schaltungen mit insgesamt 63 000 Kontakten auf einen Effektivwert von 1 V erhöht werden konnte, wurden im Berichtsjahr erstmals in der PTB vierfach gestapelt Josephson-Kontakte eingesetzt (siehe Bild 4). Durch diese und andere Optimierungsmaßnahmen soll die Komplexität von pulsgetriebenen 1-V-Josephson-Spannungsnormalen in Zukunft verringert werden.

Die messtechnischen Anwendungen von pulsgetriebenen Josephson-Spannungsnormalen wurden systematisch ausgebaut. Im Berichtsjahr wurde eine Impedanzmessbrücke entwickelt, mit der ein 10 nF-Kapazitätsnormal direkt auf einen Quanten-Hall-Widerstand zurückgeführt werden kann (siehe Bild 5). Zur Bestimmung des Verhältnisses der Spannungen an den beiden Wechselstromwiderständen

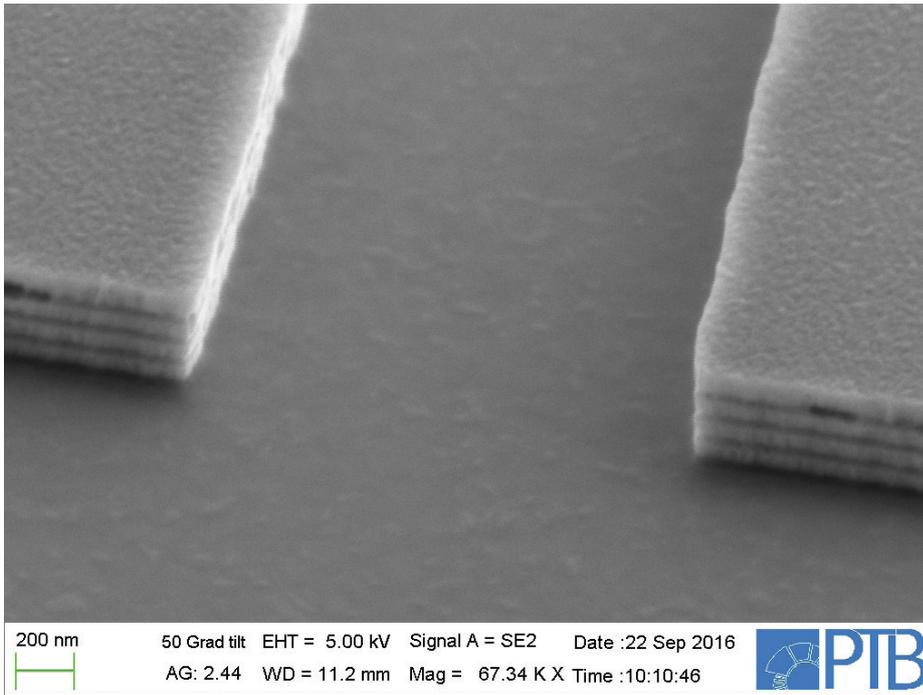


Bild 4: Rasterelektronen-Mikroskopaufnahme von vierfach gestapelten Josephson-Kontakten

wurden pulsgetriebene Josephson-Spannungsnormale eingesetzt. Der Vergleich mit den Ergebnissen einer konventionellen Verhältnismessbrücke auf Basis induktiver Spannungsteiler ergab eine hervorragende Übereinstimmung von besser als  $10^{-7}$ .

Weiterhin wurde mithilfe eines pulsgetriebenen Josephson-Spannungsnormals ein präziser Mikrovoltgenerator entwickelt. Dieser Generator kann als Teil eines 1-V-Systems den Spannungsbereich bis hinunter zu 10 nV abdecken. Die Messungen mit dem Mikrovoltgenerator sind automatisierbar und der Messaufbau ist für einfache, aber quanten-

genaue Kalibrierungen von Nanovoltmetern und Lock-In-Verstärkern hervorragend geeignet.

Die metrologischen Anwendungen von pulsgetriebenen Josephson-Spannungsnormalen gehen über die elektrische Metrologie hinaus. Sie werden auch in der Johnson-Rauschthermometrie zur Darstellung des Kelvins und zur Temperaturmessung im neuen SI eingesetzt. Pulsgetriebene Josephson-Spannungsnormale sind das Kernstück von Rauschgeneratoren, die ein quasi-weißes Rauschen für die Rauschthermometrie erzeugen. Im Berichtsjahr wurden erste Schaltungen für das mit der Abteilung

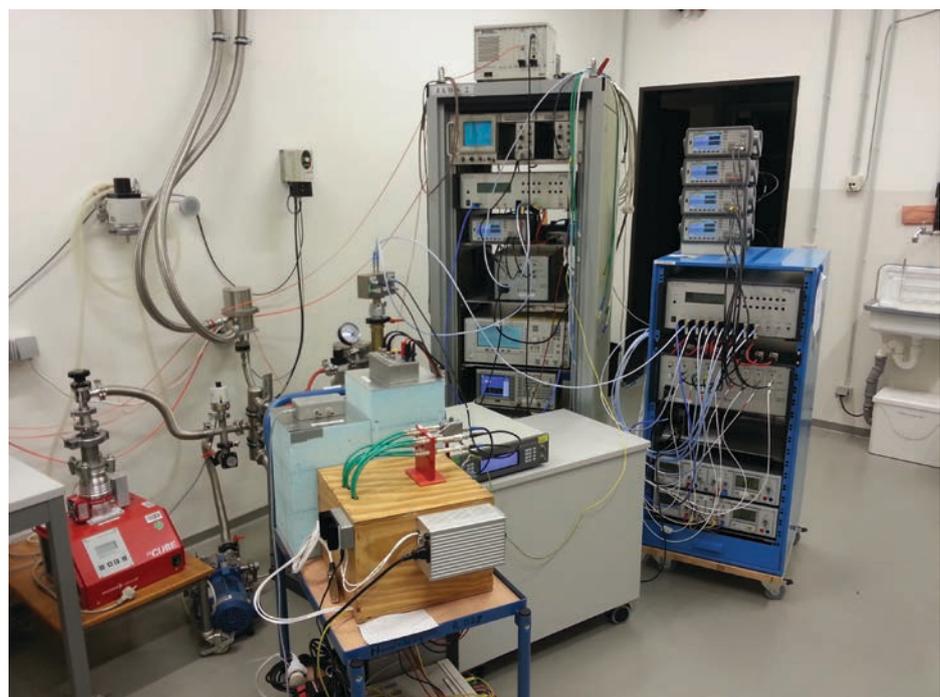


Bild 5: Labor für die Entwicklung einer Impedanzmessbrücke mit pulsgetriebenen Josephson-Spannungsnormalen

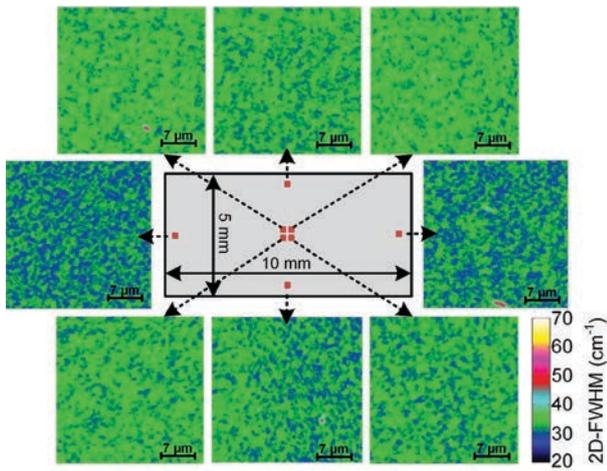


Bild 6: Spektroskopische Aufnahme einer Graphen-Schicht. In den grün-blauen Bereichen ist die Schicht monolagig.

7 der PTB gemeinsam bearbeitete Projekt „elektronisches Kelvin“ entworfen und gefertigt.

Auch binäre programmierbare Josephson-Spannungsnormale finden weiterhin Verwendung. In Zusammenarbeit mit zwei Industriepartnern wird in einem vom Bundeswirtschaftsministerium geförderten Technologietransferprojekt ein Quantenkaliibrator auf Basis von binären Josephson-Normalen entwickelt. Das Messsystem soll die automatisierte Kalibrierung der elektrischen Größen Spannung, Widerstand und Stromstärke über einen weiten Werte- und Frequenzbereich erlauben.

Zur Vereinfachung der Quanten-Hall-Metrologie bietet monolagiges Graphen großes Potenzial. Solche Graphen-Schichten können inzwischen in der Abteilung aus SiC über Flächen von mehreren Quadratmillimetern hergestellt werden, ohne dass Doppellagen auftreten (siehe Bild 6). In Gleichstrommessungen wird der Quanten-Hall-Widerstand mithilfe solcher Schichten auch bei höheren Temperaturen von 4,2 K mit Messunsicherheiten von  $10^{-9}$  und besser reproduziert. Für Wechselstrommessungen und die Impedanzmetrologie wurde eine an

der PTB für GaAs-Proben entwickelte Schirmungsmethode im Berichtsjahr erfolgreich für Messungen an Graphen-Quanten-Hall-Proben genutzt. Damit konnte erreicht werden, dass der Quanten-Hall-Widerstand bei einer Frequenz von 1 kHz mit einer relativen Messunsicherheit von  $2,5 \cdot 10^{-9}$  mit dem Gleichstrom-Wert übereinstimmte.

Auf dem Gebiet der klassischen Wechselstrom-Messtechnik wurde ein verbesserter Messaufbau für die Kalibrierung von Brückennormalen fertiggestellt. Der verbesserte Messaufbau ermöglicht Brückennormal-Kalibrierungen in einem Frequenzbereich von 225 Hz bis 5 kHz bei deutlich verringertem Kalibrieraufwand, aber gleicher oder sogar verringerter Messunsicherheit. Brückennormale werden zur Kalibrierung von dynamischen Brückenverstärkern verwendet. Für solche Kalibrierungen wurde ein weiterentwickeltes dynamisches Brückennormal an die Abteilung *Mechanik und Akustik* übergeben (siehe Bild 7), die damit Messsysteme für dynamische mechanische Größen entwickelt.

## Elektrische Energiemesstechnik

Die Arbeiten im Gebiet der elektrischen Energiemesstechnik werden stark durch die Herausforderungen der Energiewende geprägt. Ein Baustein für den Erfolg der Energiewende ist die Einführung von „Smart Metering“. Beim Smart Metering wird die elektrische Energie für Abrechnungszwecke mit intelligenten Messsystemen erfasst. Das Herzstück solcher Messsysteme ist das Smart Meter Gateway, mit dem die Messwerte aus dem Energiezähler aufbereitet und sicher an die Marktteilnehmer übermittelt werden. Die Gateways dürfen nur für Abrechnungszwecke eingesetzt werden, wenn sie vom Eichrecht vorgegebene Anforderungen erfüllen. Um dies zu überprüfen, müssen Funktionsprüfungen mittels einer geeigneten Testumgebung durchgeführt werden. Zu deren Entwicklung ist die Abteilung eine Kooperation mit Partnern aus der Industrie eingegangen, die bereits ein



Bild 7: Dynamisches Brückennormal für die Kalibrierung von Brückenverstärkern

Testsystem entwickelt haben, mit dem Interoperabilitätstests an Gateways durchgeführt werden können. In der vereinbarten Kooperation ist unter anderem vorgesehen, die eichrechtlich relevanten Testfälle aus den PTB-Anforderungen 50.8 zu realisieren.

Durch den zunehmenden Einsatz regenerativer Energiequellen mit fluktuierender Erzeugungsleistung werden Speichersysteme in Zukunft eine wichtige Rolle spielen. Um den Einsatz kleiner Speichersysteme in Privathaushalten mit Photovoltaikanlagen zu fördern, entwickelt die Abteilung Messsysteme für die Erfassung komplexer, auch bidirektionaler Energieflüsse zwischen Versorgungsnetz, Haushaltsverbrauchern, Photovoltaik-Erzeugungsanlagen und Energiespeichern. Mithilfe solcher Messsysteme sollen auch kleine Speichersysteme in privaten Haushalten simultan für die Bereitstellung netzdienlicher Regelleistung und zur Eigenverbrauchsoptimierung genutzt werden.

Durch die Nutzung nichtlinearer Verbraucher entstehen verstärkt Oberschwingungen im elektrischen Versorgungsnetz. Diese werden mit sogenannten Netzzurückwirkungsmessgeräten gemessen. Erhebungen der Bundesnetzagentur haben ergeben, dass unterschiedliche Netzzurückwirkungsmessgeräte widersprüchliche Ergebnisse liefern. Daher entwickelt die Abteilung in einem Technologietransferprojekt mit einem Industrieunternehmen und der Bundesnetzagentur ein Prüflastnormal für die Kalibrierung von Netzzurückwirkungsmessgeräten.

Die derzeit bei der Energieübertragung eingesetzten Komponenten für die Steuerung der Blindleistung, wie beispielsweise Drosseln oder Kondensatoren, weisen eine nicht zu vernachlässigende Verlustleistung auf. Daher vereinbaren Netzbetreiber eine maximale Verlustleistung mit den Herstellern der entsprechenden Komponenten. Um die Verlustleistung rückgeführt zu messen, wurde im Berichtsjahr ein Leistungsmesssystem aufgebaut, das in der Lage ist, die Verluste von Drosseln und Kondensatoren bei Spannungen bis maximal 150 kV und Stromstärken bis zu einigen kA zu messen (siehe Bild 8).

### Hochfrequenz- und Terahertz-Metrologie

Im Schwerpunktgebiet *Hochfrequenz* (HF) werden die Messmöglichkeiten im GHz- und THz-Frequenzbereich systematisch ausgebaut, insbesondere die Rückführung der HF-Grundgrößen in den verschiedenen Wellenleitertypen. Dabei spielt die HF-Leistung, insbesondere im Hinblick auf die Einhaltung von Strahlungsgrenzwerten, eine Schlüsselrolle, da weitere HF-Messgrößen wie die elektrische Feldstärke und die elektromagnetische Strahlungsdichte von ihr abgeleitet werden. Daher wurde mit der Industrie ein Leistungstransferstandard für das Frequenzband von 75 GHz bis 110 GHz entwickelt, der kommerziell erhältlich ist. Der Aufbau eines neuartigen Hohlleitermikrokalorimeters für dieses Frequenzband wurde erfolgreich abgeschlossen. Dabei konnte die Messunsicherheit durch den Einsatz eines dielektrischen Wellenleiters verringert werden.



Bild 8: Messsystem zur Bestimmung der Verluste von Blindleistungskomponenten. Hochspannungswandler (links), Stromkomparator (rechts) und selbstentwickeltes Abtastsystem (in der Mitte vorne). Das Messobjekt – eine Strombegrenzungsdrossel für die Mittelspannungsebene – ist im Hintergrund zu sehen.



Bild 9:  
Übertragungsmessung  
zwischen zwei Antennen auf  
dem Freifeld der PTB

Für die Kalibrierung von Streuparametern in koaxialen Wellenleitern für Frequenzen bis 67 GHz (1,85-mm-System) wurden „CMC-Einträge“ erwirkt, d. h. die Kalibrierung kann mit Verweis auf das CIPM-MRA angeboten werden. Ein solcher Schritt ist für Streuparametermessungen in koaxialen Wellenleitern für Frequenzen bis 110 GHz (1,0-mm-System) geplant.

Die Kalibrierung der Abstrahleigenschaften von Antennen erfolgt durch Bestimmung des Antennenfaktors oder Antennengewinns. Für große Antennen im Frequenzbereich zwischen einigen MHz und etwa 3 GHz müssen die Messungen auf einem Freifeld erfolgen, einem großen, ebenen Bodenreflektor in einer reflexionsfreien Umgebung. An der PTB steht ein solches Freifeld zur Verfügung (siehe Bild 9). Im Berichtsjahr wurden in Kooperation mit der Helmut-Schmidt-Universität Hamburg Fehlerinflüsse bei der Kalibrierung von Antennen auf Freifeldmessplätzen untersucht. Ziel ist es, die dabei

auf tretenden Messunsicherheitsbeiträge zu quantifizieren. Die gewonnenen Erkenntnisse sind auch für die Optimierung von Freifeldmessplätzen nützlich.

Für Frequenzen oberhalb von einem GHz erfolgt die Bestimmung des Antennengewinns üblicherweise in Vollabsorberräumen. Der Vollabsorberraum der PTB ist mit einem Antennenscanner ausgestattet, der es ermöglicht, die richtungsabhängige Abstrahlcharakteristik zu erfassen (siehe Bild 10). Auch in Vollabsorberräumen ist Mehrwegeausbreitung bei der Kalibrierung von Antennen aber nicht auszuschließen und stellt oftmals den größten Messunsicherheitsbeitrag dar. Daher wurden Verfahren untersucht, die Mehrwegeausbreitung zu unterdrücken. Die Untersuchungen dienen zur Etablierung eines Kalibrierangebots für Antennenparameter.

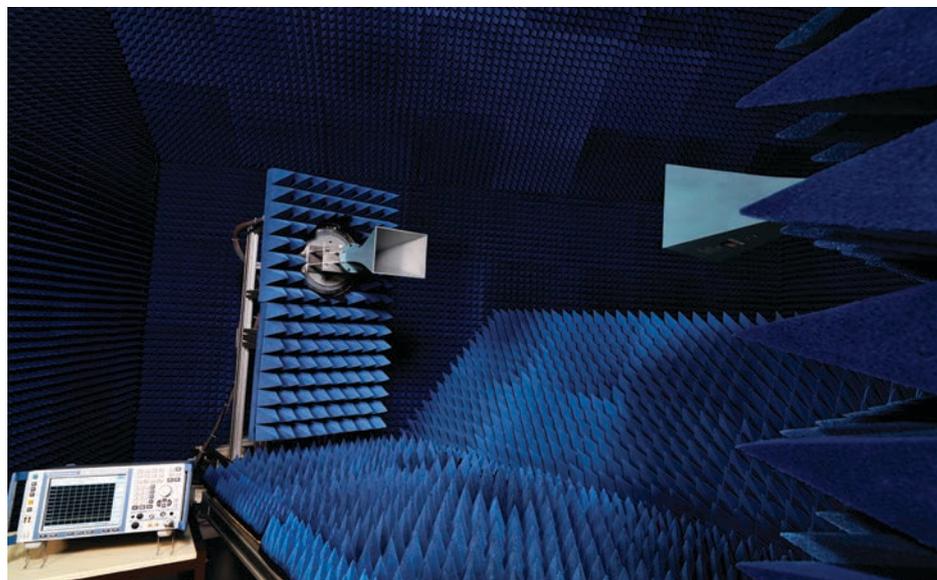


Bild 10: Antennenscanner  
im Vollabsorberraum der  
PTB

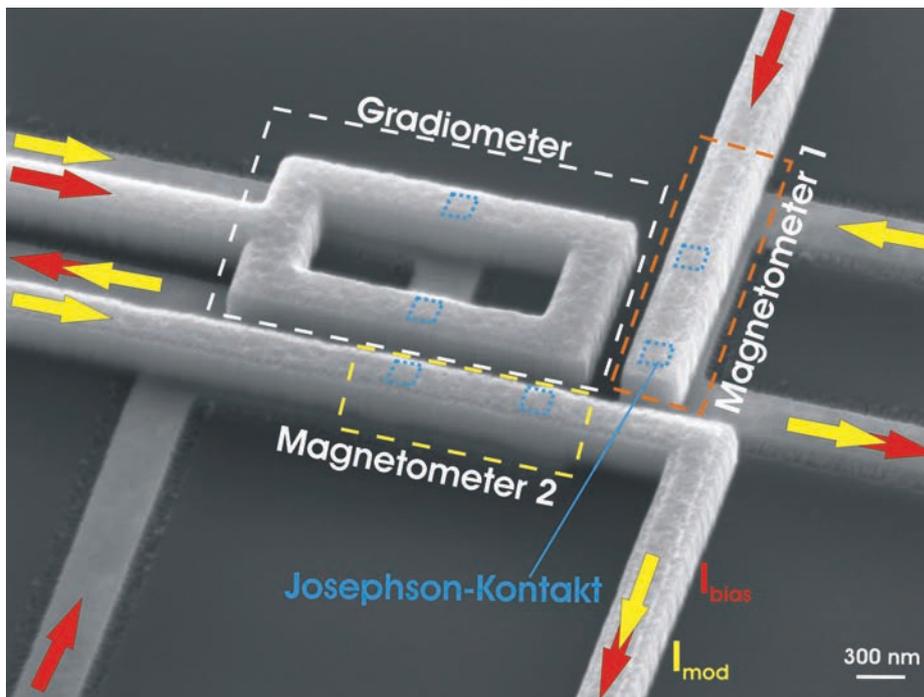


Bild 11: Rasterelektronen-Mikroskop-Aufnahme eines 3D-Vektor-NanoSQUID-Detektors

### Metrologie für magnetische Nanostrukturen

Die Arbeiten im Schwerpunktgebiet *Nanomagnetismus* haben zum Ziel, rückführbare Messverfahren für die Parameter magnetischer Nanostrukturen und für die orts aufgelöste Messung magnetischer Felder zu entwickeln. Im Berichtsjahr sind ein EM-PIR-Projekt sowie ein Technologietransferprojekt eingeworben worden, die das Ziel haben, die orts aufgelöste Magnetfeldmesstechnik zu verbessern.

Ferromagnetische Resonanzmessungen gestatten es, wichtige magnetische Parameter wie z. B. magnetische Anisotropien zu bestimmen. Diese Kenngrößen sind auch für mikro- und nanostrukturierte magnetische Strukturen von großem Interesse. Allerdings nimmt die Signalstärke mit dem Probenvolumen ab. Daher wurde ein interferometrisches Verfahren entwickelt, das die Messempfindlichkeit um fast zwei Größenordnungen erhöht. Damit können zukünftig auch die magnetischen Eigenschaften einzelner Nanostrukturen mit ferromagnetischen Resonanzmessungen untersucht werden.

Die umfassende Untersuchung des Magnetisierungszustandes von magnetischen Nanopartikeln, die z. B. in der Medizin Verwendung finden, erfordert hochempfindliche dreidimensionale Sensoren. Basierend auf der in der Abteilung hoch entwickelten Technologie zur Herstellung von SQUIDs mit Nanometerabmessungen wurde im Rahmen eines DFG-Projektes zusammen mit der Universität Tübingen ein 3D-Vektor-NanoSQUID-Detektor entwickelt (siehe Bild 11). Der Detektor erlaubt die Messung aller drei Vektorkomponenten des magnetischen Momentes von Nanopartikeln.

## In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

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

### Grundlagen der Metrologie

#### Erhöhung der Ausgangsspannung des Quanten-Wechselspannungsnormals durch Steigerung der Integrationsdichte

Um die Komplexität pulsgetriebener 1-V-Josephson-Schaltungen zu verringern, wurden erstmals 4-fach gestapelte Kontakte und längere Ketten eingesetzt. Dadurch konnte die Anzahl der Josephson-Kontakte auf 14 000 pro Schaltung erhöht werden. Es wurden 4 statt 2 Schaltungen pro Chip integriert. In einem ersten Test wurde auf einem Chip mit 41 600 Kontakten eine Ausgangsspannung von mehr als 0,5 V RMS erzeugt. (O. Kieler, FB 2.4, [oliver.kieler@ptb.de](mailto:oliver.kieler@ptb.de))

#### Erste Josephson-Schaltungen für das Projekt „elektronisches Kelvin“ konzipiert und hergestellt

Für das in diesem Jahr gestartete Projekt „elektronisches Kelvin“ wurden Designs für geeignete Josephson-Schaltungen konzipiert und daraus mehrere Layouts erstellt. Erste Schaltungen wurden gefertigt und können demnächst charakterisiert werden. Mit bereits vorhandenen Schaltungen älteren Designs wurden exemplarisch Wellenformen synthetisiert, die eine synthetische Rauschspannung repräsentieren. (O. Kieler, FB 2.4, [oliver.kieler@ptb.de](mailto:oliver.kieler@ptb.de))

#### Geringere Unsicherheiten bei AC-DC-Transfermessungen bis 1 MHz mit dem JAWS in einem Mini-Kryostat

Bei Kalibrierungen mit Josephson-Wechselspannungen ist bei höheren Frequenzen der Einfluss der Kabel zwischen Chip und Prüfling zu berücksichtigen. Durch Halbierung der Kabellänge auf 0,6 m in einem Mini-Kryostaten gelang es in gemeinsamen Messungen mit dem VSL (Niederlande), die AC-DC-Transferdifferenz bei 1 MHz um mehr als eine Größenordnung auf 700  $\mu\text{V}/\text{V}$  zu reduzieren. (O. Kieler, FB 2.4, [oliver.kieler@ptb.de](mailto:oliver.kieler@ptb.de))

#### Al/AIO<sub>x</sub>/Al-SQUID-Reihenschaltung als On-chip-Mikrowellenfilter gegen Einzelquanten-Streifelder bei mK-Temperaturen

Ein hocheffizienter On-chip-Mikrowellenfilter wurde für den Einsatz in Einzelquanten-Schaltungen bei  $T \sim 100$  mK entwickelt. Der Filter besteht aus einer Reihenschaltung mit bis zu 40 Josephson-Interferometern (sogenannten „SQUIDs“) und zeich-

net sich durch einen variablen, frequenzabhängigen Unterdrückungsfaktor  $g \sim 10^1 \dots 10^4$  für Photonen-Streifelder im Frequenzbereich  $f \sim 100$  GHz bis 200 GHz aus. (S. Lotkhov, FB 2.4, [sergey.lotkhov@ptb.de](mailto:sergey.lotkhov@ptb.de))

#### 3D-Vektor-nanoSQUID-Detektor für die räumliche Erfassung des magnetischen Moments von Nanoteilchen

Eine vollständige Untersuchung von magnetischen Nanoteilchen erfordert hochempfindliche, dreidimensionale Sensorsmesstechniken. Die Magnetfeldsensoren sollten dabei nicht viel größer als die Objekte selbst sein. Dank der an der PTB vorhandenen Technologie zur Herstellung von NanoSQUIDs auf Basis von überdämpften Josephson-Kontakten wurde die Entwicklung eines kombinierten Detektors möglich. (V. Morosh, FB 2.4, [viacheslav.morosh@ptb.de](mailto:viacheslav.morosh@ptb.de))

#### Frequenzmultiplexing von RF-SETs für Einzel-elektronenexperimente

Für die Realisierung des neuen Quantenstandards für das Ampere werden hybride Schaltungen aus halbleitenden Einzelelektronenpumpen und metallischen Einzelelektronentransistoren (SET) entwickelt. Die SETs sind in der Lage, einzelne Elektronen zu detektieren, und dienen dazu, die Genauigkeit der Pumpen zu validieren. Durch die Verwendung von RF-SETs kann eine höhere Bandbreite realisiert werden. (D. Reifert, FB 2.4, [david.reifert@ptb.de](mailto:david.reifert@ptb.de))

#### Parametrischer Wanderwellen-Verstärker mit Dreiwellenmischung auf der Basis einer Serienschaltung von Einzelkontakt-SQUIDs

Parametrische Verstärker mit Josephson-Kontakten (JPAs) sind etablierte Werkzeuge für die Quanten-Informationstechnologie, wo besonders ein Bedarf an sehr breitbandigen Systemen besteht. Wir schlagen einen einfachen Wanderwellen-JPA vor, der sich durch hohe Verstärkung, große Bandbreite und geringes Rauschen am Quantenlimit auszeichnet, und stellen erste experimentelle Ergebnisse dazu vor. (A. Zorin, FB 2.4, [alexander.zorin@ptb.de](mailto:alexander.zorin@ptb.de))

#### Ultra-dünner Kohlenstoffkondensator

In Zusammenarbeit mit der Universität Bielefeld wird ein substrat-freier Kohlenstoffkondensator im Nanometerbereich (*All-Carbon Nano Capacitor*, ACNC) entwickelt. Bei diesem umweltfreundlichen Konzept wird Graphen als Elektrodenmaterial und

eine Kohlenstoffnanomembran als Dielektrikum verwendet. (T. Weimann, FB 2.4, thomas.weimann@ptb.de)

### **Charakterisierung symmetrischer Photodetektoren**

Symmetrische Photodetektoren, die für neuartige optische Kommunikationssysteme wichtig sind, wurden mit einem laserbasierten Netzwerkanalysator charakterisiert. (M. Bieler, FB 2.5, mark.bieler@ptb.de)

### **Untersuchung der Anisotropierelaxation in Halbleitern**

Ultraschnelle, optisch induzierte Ströme in Halbleitern ermöglichen die Untersuchung von Anisotropierelaxation mit einer Zeitauflösung im Subpikosekunden-Bereich. (M. Bieler, FB 2.5, mark.bieler@ptb.de)

### **Detektion einzelner Elektronen aus einer Einzelladungspumpe nun auch im Magnetfeld möglich**

Die in der PTB entwickelten Einzelelektronenpumpen ermöglichen den kontrollierten Transport einzelner Elektronen, die sich in situ detektieren lassen. Diese Form der Einzelladungsdetektion gelingt nun auch erstmals in einem äußeren Magnetfeld, das für die Präzision der Einzelelektronenquellen eine wichtige Rolle spielt. (L. Freise, FB 2.5, lars.freise@ptb.de)

### **Hervorragende Präzisionsmessungen an Graphen-Widerstandsnormalen aus Graphen-Monolagen**

An der PTB ist es gelungen, Graphen auf einem Siliziumkarbid-Substrat großflächig und kontrolliert so abzuscheiden, dass dabei keinerlei Doppellagen mehr entstehen. Elektrische Präzisionsmessungen haben gezeigt, dass sich dieses Monolagen-Graphen hervorragend zur Herstellung von Quanten-Hall-Widerstandsnormalen eignet. (K. Pierz, FB 2.5, klaus.pierz@ptb.de)

### **Interferometrische VNA-FMR-Messungen mit verbesserter Empfindlichkeit**

Mit einem interferometrischen Verfahren konnte die Empfindlichkeit breitbandiger ferromagnetischer Resonanzmessungen (FMR) um fast zwei Größenordnungen gesteigert werden. Auf diese Weise können zukünftig die magnetischen Eigenschaften einzelner Nanostrukturen mit FMR-Messungen untersucht werden. (S. Sievers, FB 2.5, sibylle.sievers@ptb.de)

### **Einzelelektronenpumpe auf Basis einzelner Dotieratome**

Einzelelektronenpumpen transportieren einzelne Elektronen mit hoher Frequenz und erzeugen so einen quantisierten Strom. Die PTB ist bereits führend in der Herstellung und Vermessung solcher Einzelelektronenpumpen aus Galliumarsenid. Nun konnte ein neuartiger Typ einer Einzelelektronenpumpe durch Nutzung einzelner Dotieratome in Silizium-basierten Nanostrukturen realisiert werden. (T. Wenz, FB 2.5, tobias.wenz@ptb.de)

### **Direkte Rückführung eines 10-nF-Kapazitätsnormals auf den Quanten-Hall-Widerstand mithilfe einer pulsgetriebenen Josephson-Impedanzmessbrücke**

Die neue Impedanzmessbrücke der PTB nutzt spektral reine, quantengenaue Sinusspannungen, die von pulsgetriebenen Josephson-Schaltungen (JAWS) erzeugt werden. Messungen mit dieser Brücke zeigten eine sehr gute Übereinstimmung mit Impedanzmessbrücken klassischer Bauart. Nun wurde diese Messbrücke erstmals genutzt, um ein 10-nF-Kapazitätsnormal direkt auf den Quanten-Hall-Widerstand zurückzuführen. (S. Bauer, FB 2.6, stephan.bauer@ptb.de)

### **Erste Messergebnisse der neuen pulsgetriebenen Josephson-Impedanzmessbrücke**

Eine neue Impedanzmessbrücke an der PTB nutzt die spektral sehr reinen Sinusspannungen, die mit pulsgetriebenen Josephson-Schaltungen erzeugt werden. Schon in den ersten Messungen mit dieser Brücke zeigte sich eine sehr gute Übereinstimmung mit anderen Josephson-Impedanzmessbrücken und mit kommerziellen Geräten. (S. Bauer, FB 2.6, stephan.bauer@ptb.de)

### **Hohe Beteiligung an der wichtigsten Fachkonferenz der elektrischen Metrologie: CPEM 2016**

Die Abteilung *Elektrizität* der PTB beteiligte sich in hohem Umfang an der Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM), welche vom 10.-15. Juli 2016 in Ottawa (Kanada) stattgefunden hat. Die CPEM ist die wichtigste Fachkonferenz auf dem Gebiet der elektrischen Präzisionsmetrologie. (H. Scherer, FB 2.6, hansjoerg.scherer@ptb.de)

### **Heliumverflüssiger für die PTB in Braunschweig**

In der Abteilung *Elektrizität* wurde im Mai 2016 ein Heliumverflüssiger in Betrieb genommen, der den PTB-Standort Braunschweig im Routinebetrieb mit Flüssighelium versorgt. Die Anlage deckt vor allem den Bedarf der Forschung, Entwicklung und An-

wendung von elektrischen Quantennormalen. Von der höheren Versorgungssicherheit mit Flüssighelium profitieren aber auch andere Arbeitsgebiete der PTB. (F. J. Ahlers, FB 2.6, franz.ahlers@ptb.de)

### **Graphen für die zukünftige Realisierung der Kapazitätseinheit**

Graphen weist neben interessanten elektrischen Eigenschaften auch einen Quanten-Hall-Effekt auf, der für die Metrologie von großem Interesse ist, sowohl für die Realisierung der Widerstandseinheit Ohm als auch für die Realisierung der Kapazitätseinheit Farad. Eine an der PTB für herkömmliche GaAs-Proben entwickelte Schirmungsmethode wurde nun auch erfolgreich mit einer Graphen-Probe genutzt. (J. Schurr, FB 2.6, juergen.schurr@ptb.de)

### **Verbesserter Weltrekord bei Stromstärkemessung an Einzelelektronenpumpen**

Die PTB hat ihren Weltrekord aus dem Vorjahr übertroffen, bei dem elektrische Ströme aus Einzelelektronenpumpen mit einem speziellen Messverstärker mit höchster Genauigkeit gemessen wurden. Die neue Bestmarke von 0,16  $\mu\text{A}/\text{A}$  relativer Messunsicherheit wurde durch Verbesserungen des experimentellen Aufbaus erreicht. Zudem wurde das Ergebnis in einer deutlich verkürzten Messzeit erzielt. (H. Scherer, FB 2.6, hansjoerg.scherer@ptb.de)

### **Präziser Mikrovoltgenerator auf Basis eines pulsgetriebenen Josephson-Spannungsnormals**

Auf Basis eines pulsgetriebenen Josephson-Spannungsnormals wurde ein präziser Mikrovoltgenerator entwickelt. Dieser Generator kann als Teil eines 1-V-Systems den Spannungsbereich bis hinunter zu 10 nV abdecken. Mit automatisierten Messungen wurde die hervorragende Eignung für einfache, aber quantengenaue Kalibrierungen von Nanovoltmetern und Lock-in-Verstärkern nachgewiesen. (R. Behr, FB 2.6, ralf.behr@ptb.de)

### **Erste metrologische Anwendung des 1 V Josephson Arbitrary Waveform Synthesizers der PTB**

In einer ersten metrologischen Anwendung wurde der neue 1 V Josephson Arbitrary Waveform Synthesizer (JAWS) der PTB zur Kalibrierung von Thermokonvertern genutzt. Dabei wurde ein Transkonduktanzverstärker des NMI Australien für die AC-DC-Messungen eingesetzt. (L. Palafox, FB 2.6, luis.palafox@ptb.de)

### **Weiterentwicklung des AC-Quantenvoltmeters zum Quantenkalibrator**

Das AC-Quantenvoltmeter, ein auf dem Josephson-Effekt beruhendes Gleich- und Wechselspannungsmesssystem, wurde bereits früher zu einem industriellen Kalibrierlabor transferiert und dort akkreditiert. Im Rahmen eines Technologietransferprojekts wurde es zu einem Quantenkalibrator weiterentwickelt. Dafür wurden nur in Kalibrierlaboren ohnehin zur Verfügung stehende Geräte eingesetzt. (M. Bauer, FB 2.6, martin.bauer@ptb.de)

### **Metrologie für die Wirtschaft**

#### **Umstellung auf verbesserten Messplatz für Brückennormal-Kalibrierungen ist abgeschlossen**

Für die Kalibrierung von Brückennormalen wurde die Umstellung auf einen verbesserten Messplatz erfolgreich abgeschlossen. Der verbesserte Messplatz ermöglicht Brückennormal-Kalibrierungen in einem Frequenzbereich von 225 Hz bis 5 kHz bei deutlich verringertem Kalibrieraufwand. Im Vergleich zu der zuvor verwendeten Kalibriereinrichtung liefert dieser Messplatz unverändert kleine Unsicherheiten für Hochpräzisionsmessungen bei 225 Hz und stabilere Kalibrierbedingungen mit verringerter Unsicherheit zu hohen Messfrequenzen bis 5 kHz. (F. Beug, FB 2.1, florian.beug@ptb.de)

#### **Weiterentwickeltes dynamisches Brückennormal für ein erweitertes Kalibrierangebot dynamischer Brückenverstärker**

Für die Kalibrierung von dynamischen Brückenverstärkern wurde ein weiterentwickeltes dynamisches Brückennormal an den Fachbereich *Akustik und Dynamik* der Abteilung *Mechanik und Akustik* übergeben. Damit wird dort ein Kalibrierangebot für frequenzabhängige sinusförmige Signale sowie für besondere Signalformen (z. B. ein dynamisches Signal mit konstantem Untergrund oder beliebige nicht-sinusoidale Signale) entwickelt. (F. Beug, FB 2.1, florian.beug@ptb.de)

#### **Verbesserte Kalibrierung kleiner Wechselstromstärken**

Das Dienstleistungsangebot zur Einheiten-Weitergabe und Beratung für DAkkS-Laboratorien und andere NMIs wurde durch die Entwicklung und Inbetriebnahme von neuen Normalen für den Wechselstromstärke-Gleichstromstärke-Transfer verbessert. (T. Funck, FB 2.1, torsten.funck@ptb.de)

### **DC-Kalibrierung von AC-DC-Strommesswiderständen**

Die geringere Messunsicherheit neuer AC-DC-Strommesswiderstände wird nur erreicht, wenn auch ihr Widerstand bei Gleichstrom genau bestimmt wird. Da Widerstandsmessbrücken bei hohen Stromstärken dafür ungeeignet sind, wurde ein Verfahren entwickelt, das eine erweiterte Kalibrierunsicherheit von  $3 \cdot 10^{-6}$  erreicht. Nach weiterer Optimierung werden damit Werte  $< 1 \cdot 10^{-6}$  möglich sein. (B. Schumacher, FB 2.1, bernd.schumacher@ptb.de)

### **Neue Hohlleitermikrokalorimeter und Leistungstransferstandards für den Millimeterwellenbereich**

Für den Frequenzbereich 75 GHz bis 110 GHz wurde ein neuartiges Hohlleitermikrokalorimeter aufgebaut und in Betrieb genommen. (R. Judaschke, FB 2.2, rolf.judaschke@ptb.de)

### **Neuartige Messtechnik für Streuparametermessungen bis 110 GHz**

Für den Frequenzbereich 0,1 GHz bis 110 GHz wurde ein neuartiger Streuparametermessplatz aufgebaut und in Betrieb genommen. (R. Judaschke, FB 2.2, rolf.judaschke@ptb.de)

### **Einflüsse der Freifeldmessplatzeigenschaften auf die Antennenkalibrierung**

Zusammen mit der Helmut-Schmidt-Universität in Hamburg werden Fehlereinflüsse bei der Kalibrierung von Antennen auf Freifeldmessplätzen untersucht. Dabei sollen Messunsicherheitsbeiträge und ihre Auswirkungen sowohl auf die Abnahmemessung des Freifeldes als auch auf die eigentliche Antennen-Kalibrierung quantifiziert werden, um eine weitere Optimierung von Freifeldmessplätzen zu ermöglichen. (T. Kleine-Ostmann, FB 2.2, thomas.kleine-ostmann@ptb.de)

### **Neues Verfahren zur Bestimmung des Phasenzentrums und zur Korrektur der Mehrwegeausbreitung bei der Antennenkalibrierung**

Im Rahmen einer Bachelor-Arbeit wurden neue Verfahren zur robusten Schätzung der Lage des Phasenzentrums und zur Korrektur von Effekten der Mehrwegeausbreitung bei der Antennenkalibrierung implementiert und validiert. Dies ist ein wichtiger Schritt hin zu einer Antennenkalibrierung mit geringer Messunsicherheit, die zukünftig von der PTB angeboten werden soll. (T. Kleine-Ostmann, FB 2.2, thomas.kleine-ostmann@ptb.de)

### **Netzwerkanalyse in Zeit- und Frequenzbereich erstmalig erfolgreich verglichen**

Ein aus koaxialen und koplanaren Komponenten bestehendes Hochfrequenz-Bauteil ist erstmalig mit zwei völlig unterschiedlichen Netzwerkanalyse-Verfahren charakterisiert worden. Für Frequenzen im Bereich 10 GHz bis 110 GHz wurde eine gute Übereinstimmung zwischen konventionellen Netzwerkanalysatormessungen im Frequenzbereich und laserbasierten elektrooptischen Messungen im Zeitbereich erzielt. (U. Arz, FB 2.2, uwe.arz@ptb.de)

### **Entwicklung eines Messsystems für die Bestimmung der Verlustleistung von Komponenten zur Leistungssteuerung in Energieversorgungsnetzen**

Die derzeit bei der Energieübertragung eingesetzten Komponenten für die Steuerung der Blindleistung wie beispielsweise Drosseln oder Kondensatoren weisen eine nicht zu vernachlässigende Verlustleistung auf. Die dadurch über die gesamte Betriebszeit akkumulierte Verlustenergie erreicht beträchtliche Größenordnungen. (E. Mohns, FB 2.3, enrico.mohns@ptb.de)

### **Neues Verfahren zur Bestimmung der Ausrichtung von Magnetfeldsonden**

Die meisten Magnetfeldsonden messen die magnetische Flussdichte nur in einer Richtung oder, wenn sie aus mehreren Einzelsensoren bestehen, jeweils nur in Richtung jedes Einzelsensors. Die exakte Richtung der Einzelsensoren ist aber bislang nur schwer zu bestimmen. Mit einem neuen Messaufbau kann die exakte Ausrichtung aller Einzelsensoren zueinander nun präzise bestimmt werden. (N. Rott, FB 2.5, nicolas.rott@ptb.de)

## **Metrologie für die Gesellschaft**

### **Zusammenarbeit von PTB und Industrie bei der Entwicklung einer Testumgebung für das Smart Metering**

Die PTB, der Netzbetreiber Mitteldeutsche Netzgesellschaft Strom mbH (Mitnetz Strom) in Halle und das Unternehmen exceeding solutions, ein Spin-Off der Hochschule Merseburg, werden bei der Entwicklung einer Testumgebung für Smart-Meter-Gateways zusammenarbeiten. (C. Leicht, FB 2.3, christoph.leicht@ptb.de)

### **Rückführung virtueller Zählpunkte**

Diskrete Messpunkte für elektrische Energie ermöglichen nur die Bestimmung der am jeweiligen Punkt geflossenen Energiemenge. In bestimmten Anwendungsfällen ist es aber notwendig, aus mehreren realen Energiezählern mithilfe von Berechnungsvor-

schriften virtuelle Zählpunkte zu bilden. In der PTB wird derzeit ein rückgeführter Prüfstand für abrechnungsrelevante virtuelle Zählpunkte aufgebaut. (M. Schmidt, FB 2.3, matthias.schmidt@ptb.de)

### **Metrologische Untersuchung von Reizstoffsprüngeräten und Elektroimpulsgeräten**

Das Waffengesetz überträgt der PTB die Aufgabe, Reizstoffsprüngeräte (RSG) und Elektroimpulsgeräte (EIG) bezüglich der Einhaltung von Grenzwerten charakteristischer Merkmale zu untersuchen und zu zertifizieren. Dazu werden geeignete Mess- und Prüfverfahren entwickelt und die elektromedizinischen Wirkungen und Gefahren der EIG werden erforscht. (X. Guo, FB 2.3, xiaofei.guo@ptb.de)

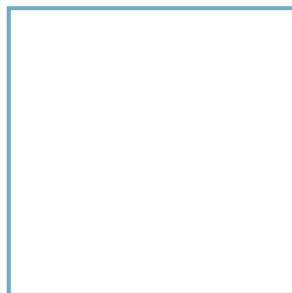
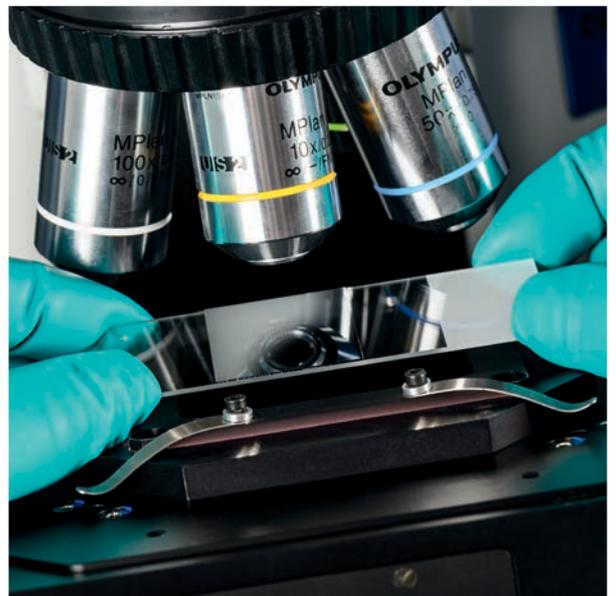
### **Internationale Angelegenheiten**

#### **Europäisches Metrologieforschungsprogramm: Erfolgreicher Abschluss von drei Projekten und Start eines neuen**

Vom 18. bis 20. Mai fand in Prag ein Dissemination Workshop statt, bei dem die Ergebnisse von drei Forschungs- und Entwicklungsprojekten vorgestellt wurden, in denen im Rahmen des Europäischen Metrologieforschungsprogramms EMRP von Juni 2013 bis Mai 2016 Fragestellungen auf dem Gebiet verschiedener elektrischer Messgrößen bearbeitet wurden. (F. J. Ahlers, FB 2.6, franz.ahlers@ptb.de)

# Abteilung 3

## Chemische Physik und Explosionsschutz



Ein Highlight in der Abteilung 3 – *Chemische Physik und Explosionsschutz* – bildete im Jahr 2016 die strategische Planung im Bereich der Metrologie für die Chemie und Biochemie. Die enorme Entwicklung biochemischer Technologien in den letzten Jahrzehnten besonders in der Medizin hat viele neue Ansätze und verbesserte Methoden für die medizinische Diagnose und Therapie hervorgebracht. Sie sind von großer Bedeutung besonders auch für die häufigsten Volkskrankheiten wie Krebs, kardiovaskuläre oder neurodegenerative Erkrankungen, die von stark zunehmender gesellschaftlicher Bedeutung sind. Oft fehlt es dabei an zuverlässigen Messverfahren, die eine wesentliche Voraussetzung sowohl für die Erforschung der biochemischen Grundlagen als auch deren nachhaltige medizinische Anwendung sind.

Gemäß ihrem gesetzlichen Auftrag zur Sicherung der Vergleichbarkeit im Messwesen und basierend auf dem Konzept der metrologischen Rückführung konzentriert sich die PTB hier auf die Entwicklung und Bereitstellung von höherwertigen, metrologisch validierten Verfahren. Besonders die sogenannten primären Referenzmessverfahren unterscheiden sich von Routineverfahren und können Messgrößen eindeutig identifizieren und quantifizieren und als messtechnische Bezugspunkte dienen.

Die PTB will sich der Herausforderung durch die Entwicklung der biochemischen Wissenschaften und Technologien der letzten Jahre noch intensiver stellen. Auf Initiative des Präsidiums hat die PTB deshalb eine Expertenkommission eingeladen, um deren Wissen in unsere Diskussion über Bedarf und grundlegende, neue Ideen in der Metrologie für die Biochemie einzubringen. Das Treffen, an dem aus der PTB die Abteilungen 3 und 8 (*Medizinphysik*) beteiligt waren, wurde im April in Braunschweig durchgeführt. Die Arbeiten im Bereich Biochemie, die Expertenkommission und die Perspektiven im Bereich Metrologie in der Biochemie bilden deshalb einen Schwerpunkt im Jahresbericht.

Große Fortschritte über die Bewertung von Zündquellen im Explosionsschutz konnten in diesem Jahr

in dem Abschlussbericht der DFG Forschergruppe publiziert werden. Dabei sind Modellrechnungen heute von zunehmender Bedeutung für das Verständnis und die Gefahrenabschätzung im Explosionsschutz. Die Simulation von Verbrennungsprozessen erfolgt anhand von Temperaturfeldern. Das bessere Verständnis der Entstehung eines Temperaturfeldes durch elektrische Entladungen war im Wesentlichen der Beitrag der PTB innerhalb der Forschergruppe und dient als Grundlage für zukünftige numerische Simulationen. Wie dies jetzt bereits zur Bewertung von explosionsgeschützten Geräten beitragen kann, ist im zweiten Schwerpunkt des Jahresberichts beschrieben.

### **Besondere Herausforderung: Metrologie für die Biochemie**

Die Metrologie für die Biochemie wurde als eine der besonderen Herausforderungen identifiziert, denen sich die PTB in den kommenden Jahren verstärkt widmen will. Der Grund für diese Fokussierung des Interesses ist eng mit einer der zentralen Aufgaben des Fachbereichs *Metrologie in der Chemie* verknüpft: Der metrologischen Qualitätssicherung für die klinische Chemie.

Hierzu hält die PTB nationale Normale für wichtige Biomarker wie z. B. Kreatinin oder Cortisol bereit und leistet damit einen Beitrag zur Qualitätsüberwachung für die klinische Chemie in Deutschland. Mit dem Ziel, frühzeitigere und verlässlichere Diagnosen sowie eine individuelle Therapie von Krankheiten zu ermöglichen, haben biochemische und klinische Forschung in den vergangenen Jahren eine Vielzahl neuer klinisch-chemischer Messgrößen hervorgebracht. Diese Messgrößen basieren oft auf Proteinmarkern, die bereits heute einen großen Teil der in Forschung und Diagnostik relevanten Biomarker darstellen. Das Aufgabenspektrum in der laboratoriumsmedizinischen Routineanalytik hat sich dadurch nachhaltig verändert.

An diesen Veränderungen orientiert sich der metrologische Forschungsbedarf, der besonders auf der Ebene von Proteinen sichtbar wird. Immunchemische Testverfahren, die in der klinischen Praxis eingesetzt werden, liefern häufig keine eindeutigen und quantitativ reproduzierbaren Ergebnisse. Fehlende Standards in diesem Bereich sind jedoch ein entscheidendes Hindernis bei der Anwendung dieser Gruppe von diagnostischen Markern. Die „International Federation of Clinical Chemistry and Laboratory Medicine (IFCC)“ strebt deshalb gemeinsam mit der Meterkonvention und der „In-

Titelbild:

Ein in der PTB entwickeltes Normal zur Kalibrierung in der Mikro-Ramanspektrometrie wird unter einem Ramanmikroskop platziert. Die auf dem Chip aufgebrachten Strukturen können zur Bestimmung der optischen Auflösung eines Mikroskops sowie zur dimensionellen Kalibrierung der x,y-Positioniereinheit eingesetzt werden.

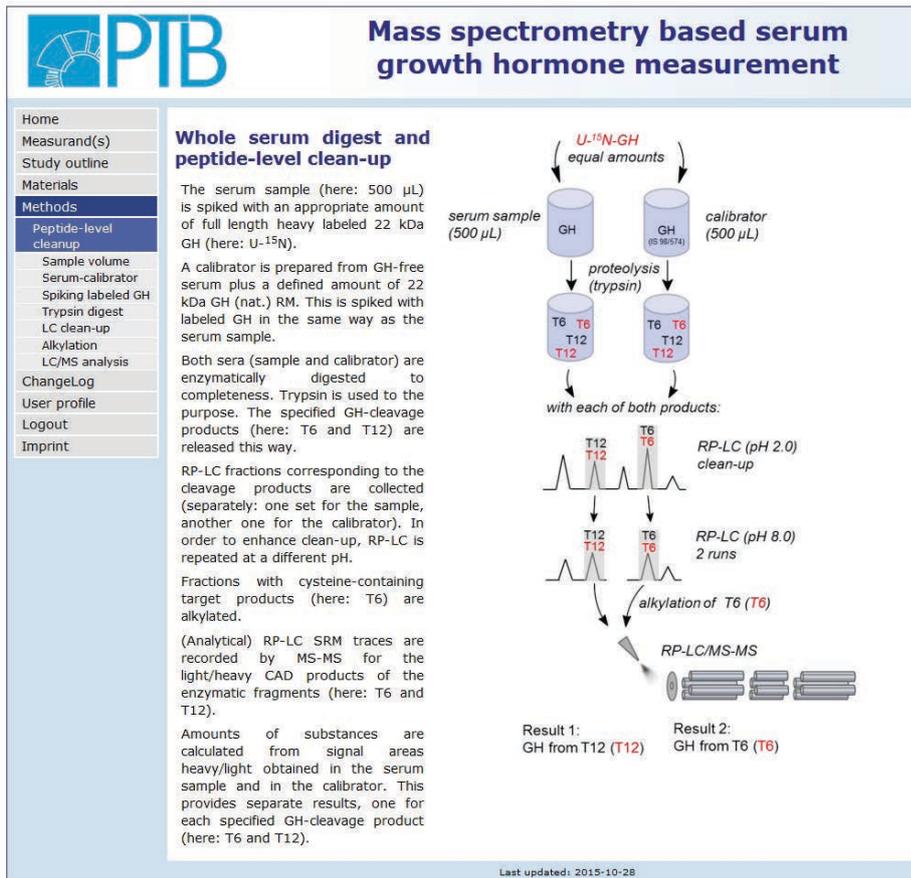


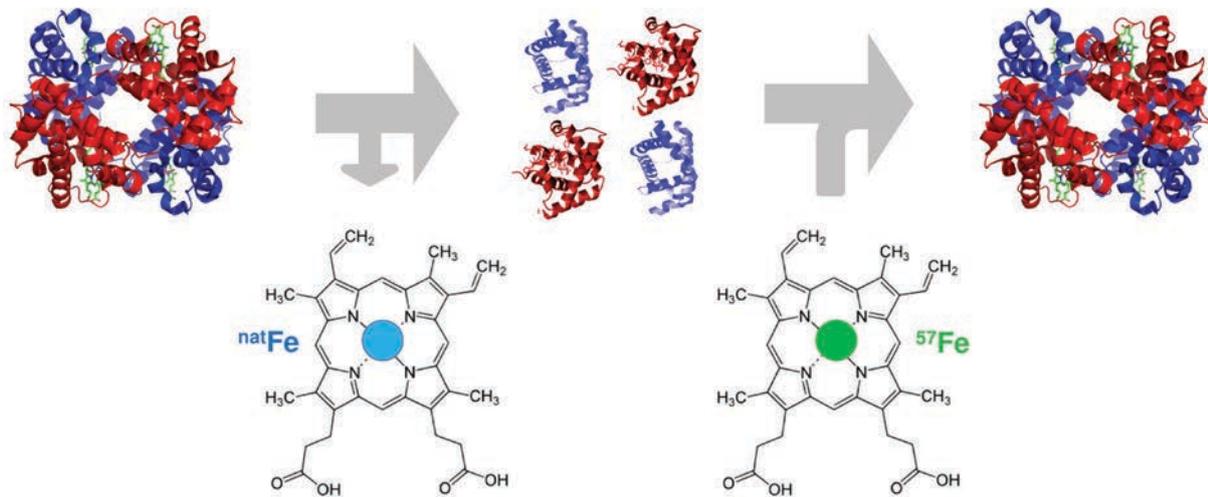
Bild 1: Weitergabe der Methode zur Bestimmung von Wachstumshormon in Serum im Rahmen des CCQM P164 durch die PTB

ternational Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC)“ vergleichbare Messergebnisse durch unabhängige Referenzmessverfahren als Bezugspunkte für solche Messgrößen an. Die Entwicklung von Referenzmessverfahren für die Proteinanalytik bildet daher einen Schwerpunkt der Forschungsarbeiten in der PTB.

Problematisch ist jedoch, dass die vorhandenen Konzepte für Referenzverfahren klinischer Marker nicht ohne Weiteres auf große Biomoleküle übertragbar sind. Ihre molare Masse ist oftmals um mehrere Größenordnungen höher als bei klassischen Biomarkern, sodass eine grundsätzliche Notwendigkeit zur Entwicklung neuartiger Methoden besteht. Ein in der PTB auf der Grundlage der organischen Massenspektrometrie entwickeltes Verfahren ist inzwischen auf internationalem Niveau akzeptiert. Das Prinzip der Methode besteht darin, das Protein definiert auf kleinere Einheiten (Peptide) herunterzubrechen, deren Größe eine zuverlässige Messung mithilfe der Massenspektrometrie gestattet. Solche Fragmente lassen sich mithilfe bestimmter Enzyme (z. B. Trypsin) erzeugen. Gleichzeitig müssen diese charakteristischen Peptide immer noch lang genug sein, um das ursprüngliche Protein anhand eines unverwechselbaren massenspektrometrischen Fingerabdrucks wiederzuerkennen, selbst aus einer komplexen Matrix wie z. B. Serum.

Für dieses Verfahren, das am Beispiel des menschlichen Wachstumshormons (HGH) entwickelt wurde, hält die PTB den weltweit ersten CMC-Claim für Proteinmessungen in Serum auf primärem Niveau. Die Weitergabe im Rahmen einer CCQM-Pilotstudie wird derzeit durch die PTB koordiniert. Die Methode bietet darüber hinaus auch die Möglichkeit, verschiedene Isoformen des HGH in Serumproben selektiv zu erfassen. Dies wird in einer Kooperation mit dem Klinikum Leipzig in der klinischen Praxis getestet.

Über 30 % des menschlichen Proteoms wird durch sogenannte Metallproteine repräsentiert. Zur Entwicklung von Messverfahren für diese Proteine, z. B. Transferrin oder Hämoglobin, wird auch ein anderer Ansatz verfolgt. Er basiert auf der Bestimmung des in diesen Molekülen gebundenen Anteils des funktionellen Metalls in Verbindung mit chromatographischen Trennverfahren. Eine der Herausforderungen, die dabei zu bewältigen ist, besteht in der Herstellung eines isotoopenmarkierten Spikematerials. Proteine, in denen das gebundene Metall in einer anderen als der natürlichen Isotopenzusammensetzung vorliegt, sind kommerziell selten verfügbar. Daher müssen z. T. mehrstufige chemische Prozesse entwickelt werden, welche den Austausch des im Protein gebundenen Metalls gegen ein anderes Isotop ermöglichen, z. B. nat-Fe gegen  $^{57}\text{Fe}$  im Hämoglobin.



Diese Verfahren wurden maßgeblich im Rahmen des EMRP-Projekts „Metalloomics“ entwickelt und werden jetzt durch die PTB auf internationaler Ebene weitergegeben. So wurde für die Bestimmung von Transferrin in Serum eine EURAMET-Vergleichsmessung organisiert und durchgeführt, eine CCQM Pilotstudie zur Quantifizierung von Hämoglobinvarianten wird derzeit vorbereitet. Die konsequente Fortsetzung dieser Arbeiten erfolgt seit Juli 2016 im EMPIR-Projekt „ReMIND“, welches ebenfalls von der PTB koordiniert wird. Die Entwicklung von Messverfahren für Biomarker zur Detektion neurodegenerativer Erkrankungen wie Alzheimer ist vorrangiges Ziel in diesem Projekt.

Für die metrologische Vorlauftforschung wurden in langfristig angelegten Kooperationen mit der TU Braunschweig Mittel eingeworben, z. B. im DFG-Graduiertenkolleg „NanoMet“. Eines der aktuell bearbeiteten Promotionsthemen befasst sich mit dem Problem, die IDMS-basierte Proteinquantifizierung mittels signifikanter Peptide auf die Quantifizierung

Bild 2: Herstellung eines an  $^{57}\text{Fe}$  angereicherten Hämoglobins als Spikematerial für die spezies-spezifische Isotopenverdünnungsmassenspektrometrie

viraler Proteine zu übertragen. Damit sollen Alternativmethoden zur Messung der sogenannten Viruslast sowie zur Bestimmung der viralen Reifung geschaffen werden. In einer weiteren Arbeit wird untersucht, inwiefern die spezifische Bindung eines Proteins an einen immobilisierten Liganden kombiniert werden kann mit einer Quantifizierung durch eine auf der Ramanspektrometrie basierende Variante der Isotopenverdünnung. In den kommenden Jahren soll die Kooperation zwischen TU-BS und PTB im Bereich der Biochemie verstetigt und ausgebaut werden, z. B. durch gemeinsame Arbeiten im Forschungsneubau LENA.

Die rasante Entwicklung in der Biochemie in den letzten zwei Jahrzehnten hat zu einer starken Verbreiterung des Themenfeldes geführt. Die Aktivitäten der PTB auf diesem Gebiet sollen daher gezielt

Bild 3: Besuch der PTB durch eine Expertenkommission mit hochrangigen Vertretern aus Industrie, Forschung, Medizin und Metrologie im April 2016 unter Vorsitz von PTB-Kurator Prof. K.-P. Jäckel



in aktuell wichtigen Feldern aufgebaut und verstärkt werden, in denen metrologische Defizite bestehen. Um diese zu identifizieren, hat die PTB im April 2016 eine Expertenkommission aus führenden Vertretern der Forschung, Industrie, Medizin und Metrologie unter Vorsitz von PTB-Kurator Prof. K.-P. Jäckel eingeladen.

Der Bedarf für die Metrologie in der Biochemie ist dabei ebenso deutlich geworden wie die Notwendigkeit einer sorgfältigen Priorisierung der Arbeitsthemen.

Die Expertenkommission empfiehlt den weiteren Ausbau der Kapazitäten für bereits begonnene Arbeiten in diesem Bereich. Vor allem auch deshalb, weil die Leistungen der PTB dringend nachgefragt werden und alternative Einrichtungen, die ähnliche Leistungen anbieten könnten, nicht existieren. Besonders auch die Methodenentwicklung zur Proteinquantifizierung in komplexen Körperflüssigkeiten wie Blut und Blutserum wurde dabei angesprochen.

Auf der Grundlage der vorhandenen Expertise in der Metrologie in der Chemie und Biochemie sollen von der Kommission empfohlene Themen aus der Laboratoriumsmedizin und auch der Pharmakologie ausgebaut und auch neue aufgenommen werden.

Für diese und weitere Arbeitsthemen befindet sich auch ein neues Gebäude im Planungsstadium, das spezielle Anforderungen der Biochemie berücksichtigen wird.

## **Zündung brennbarer Gas-/Luftgemische durch elektrische Entladungen**

Zum sicheren Betrieb von chemischen und petrochemischen Anlagen gehört die Vermeidung von Explosionsgefahren durch in die Atmosphäre austretende brennbare Gase und die Eliminierung von Zündquellen. Zu den potenziellen Zündquellen zählen elektrische Entladungen, die in verschiedensten Formen abhängig vom elektrischen Feld auftreten können. Die elektrische Feldstärke wird durch die Potentialdifferenz zwischen den Elektroden und die Geometrie der Elektrodenkonfiguration bestimmt. Durch die Coulombkraft werden Ladungsträger im elektrischen Feld beschleunigt und ab einer kritischen Feldstärke finden Ionisierungsprozesse statt, die wiederum neue Ladungsträger erzeugen können. Durch den Prozess entstehen verschiedene Entladungsformen, die vom elektrischen Feldverlauf oder der speisenden Quelle abhängen. Typische

Entladungsformen wären z. B. sogenannte Funken-, Büschel-, Oberflächen- oder Teilentladungen.

## **Zündfähigkeit von Funkenentladungen**

Im Wesentlichen findet die Zündung eines brennbaren Gas-/Luftgemisches durch elektrische Entladungen über das Temperaturfeld statt. Kommt es in einer Elektrodenanordnung mit homogenem Feld zu einer Spannung oberhalb der kritischen Feldstärke, setzt der Entladungsmechanismus ein. Zwischen den Elektroden baut sich ein leitfähiger Kanal auf, der sich in Abhängigkeit des fließenden Stroms aufheizt. Während man im Anfangsstadium der elektrischen Entladung von einem Nichtgleichgewichtsplasma spricht, geht die Entladung in ein Gleichgewichtsplasma über, wenn hinreichend Energie durch die Quelle zur Verfügung gestellt wird. Das Volumen des Kanals ist durch den Radius und den Elektrodenabstand bestimmt. Die elektrische Energie wird zum Teil im leitfähigen Kanal in Wärme umgesetzt und kann über den Widerstand des Kanals sowie den Strom abgeschätzt werden. Während der Stromverlauf der elektrischen Entladung gut bestimmbar ist, kann der Widerstand nicht direkt gemessen werden.

## **Zündfähigkeit von Kontaktvorgängen**

Funkenentladungen werden auch bei sich öffnenden Kontakten beobachtet. Für die Beurteilung des Zündverhaltens wird das in der IEC 60079-11 standardisierte Funkenprüfgerät genutzt. Hierbei werden mit schließenden und öffnenden Kontaktvorgängen elektrische Entladungen erzeugt und Zündgrenzkurven ermittelt. Der Kontaktöffnungsvorgang besteht aus einer zeitlichen Phase, in der der Wolframdraht (Anode) zunächst elektrischen Kontakt mit der Cadmium-Scheibe (Kathode) hat. Beim Gleiten des Wolframdrahtes über der Scheibe hebt der Draht zeitweise auf einen Abstand von wenigen Mikrometern ab, Mikroentladungen werden beobachtet. In dieser Phase erhitzt sich die Drahtspitze auf mehrere 100 °C. Verlässt der Draht die Cadmium-Scheibe, erfolgt der sogenannte „Öffnungsfunke“, der im physikalischen Sinne eine Metaldampf-Entladung ist. Diese Entladungen sind wenige 100 Mikrometer klein und zeitlich wenige 100 Mikrosekunden lang. Dabei wird der wesentliche Anteil der Energie in das Gas übertragen. Reicht der Energieeintrag aus, zündet das brennbare Gas-/Luftgemisch. Im Gegensatz zu Funkenentladungen zwischen zwei Elektroden, die eine Mindestfeldstärke benötigen, treten Öffnungsfunken selbst bei geringsten Spannungen auf.

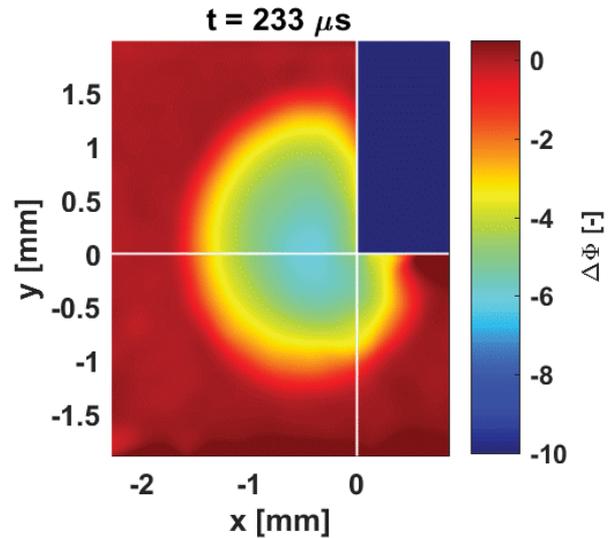
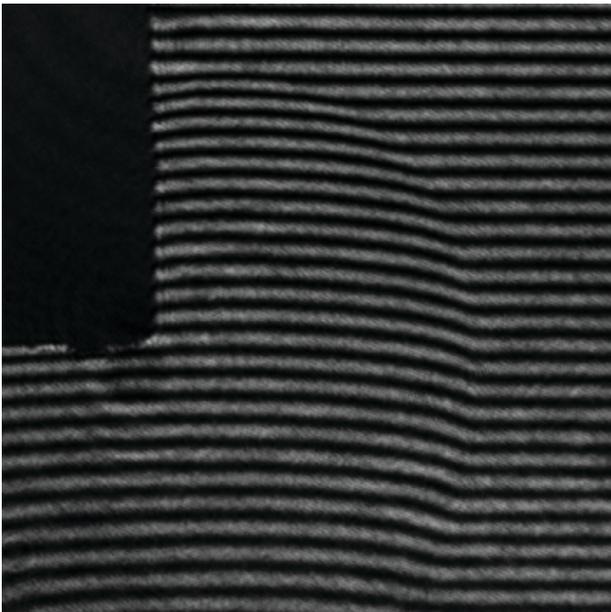


Bild 4: Beispielhaftes Interferogramm einer Flamme mit ausgewerteten Phasenverschiebungen

Für die elektrischen Entladungen zwischen den sich bewegenden Elektroden werden die Zusammenhänge zwischen der Länge bzw. der Geometrie der Entladung und den elektrischen Größen der Spannung und dem Stromwert ermittelt. In einem Funkenmodell muss der Zusammenhang zwischen zugeführter elektrischer Energie und dem entstehenden Temperaturfeld zusammengeführt werden. Die Bestimmung der Temperatur der Entladung, als maßgebliche Größe im Zündungsprozess, ist über Emissionsspektroskopie vorgesehen und befindet sich in der Vorbereitung. Die thermochemische Reaktion wird u. a. über die Ausbreitung der Flammfront untersucht. Aktuell werden dabei Schlierenuntersuchungen und die Interferometrie (in Zusammenarbeit mit dem California Institute of Technology, USA) als Verfahren eingesetzt.

Diese Zusammenhänge ermöglichen eine Simulation der elektrischen Entladung aus einem vorgegebenen Elektrodenabstand in Bezug auf die Spannungsverläufe. Das Modell basiert gegenwärtig auf drei wesentlichen Elementen, der elektrischen Schaltung, der Entladung sowie der thermochemischen Zündung (Bild 5).

Die Modellierung der elektrischen Entladung basiert auf einer Kombination von empirischen Gleichungen und messtechnisch ermittelten Charakteristiken. Die Energie aus der elektrischen Schaltung wird über die beschriebenen Zusammenhänge von Spannung, Strom und Kontaktbewegung eingebracht, die wiederum über den elektrischen Leitwert in der Schaltung wirkt.

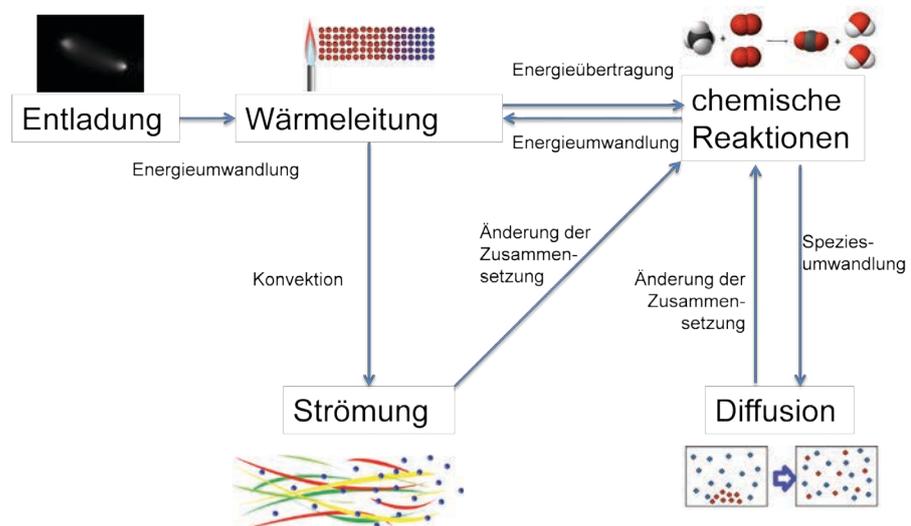


Bild 5: Überblick über die Wechselwirkungen der physikalischen Prozesse und der thermochemischen Zündung

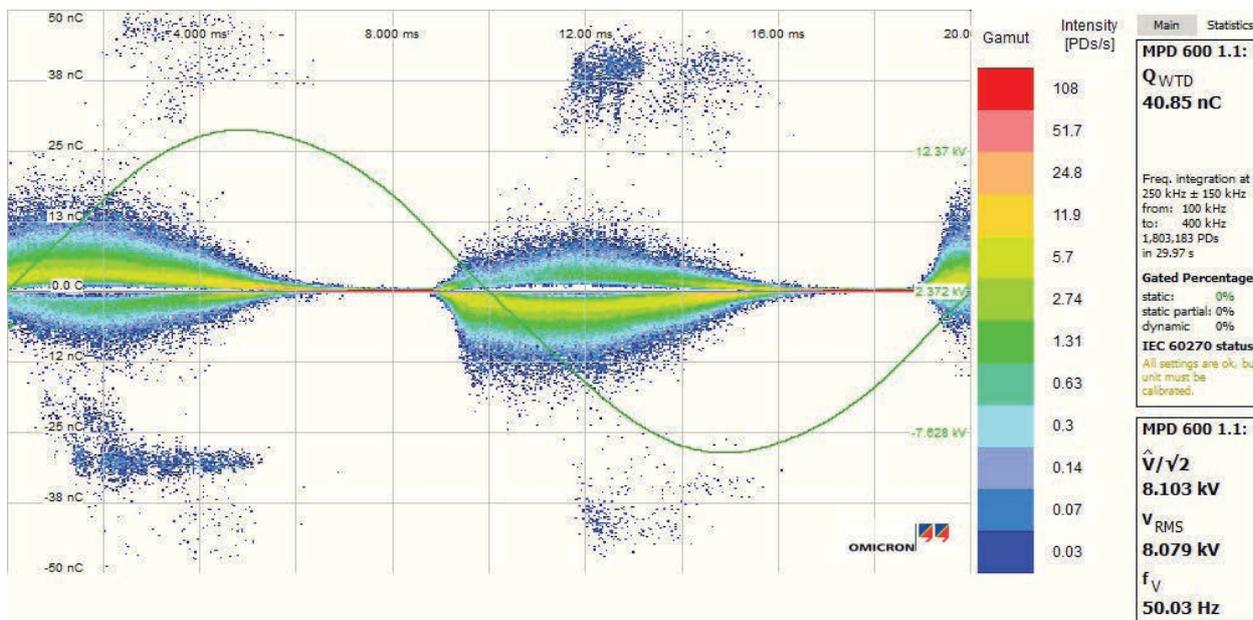


Bild 6: Teilentladungsmessung an einem Hochspannungsisolationssystem

Die thermochemische Zündung wird über die Lösung der Erhaltungsgleichungen der Strömungsmechanik zusammen mit einem detaillierten Modell der chemischen Kinetik simuliert. Die Simulation erfolgt in 3-D mittels der Software OpenFOAM. Die ersten Simulationsergebnisse wurden mit den Messergebnissen validiert und optimiert.

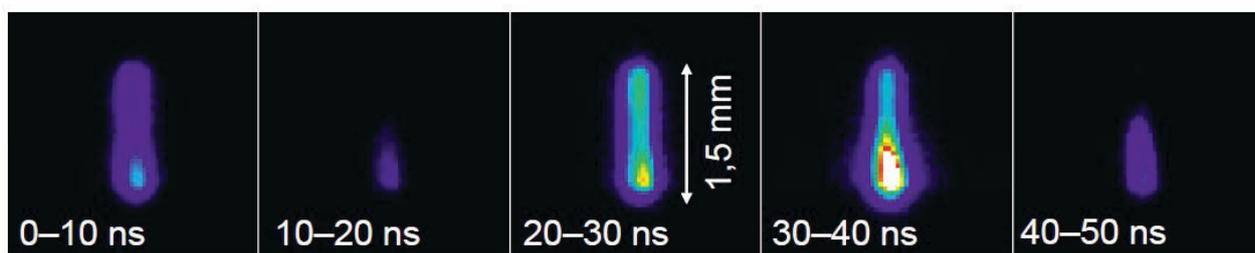
Ein elektronisches Funkenprüfgerät als Alternative zum aktuellen mechanischen Funkenprüfgerät soll reproduzierbarere Ergebnisse generieren, ohne die Verwendung von Cadmium oder brennbarer Gas-/Luftgemische. Dies vereinfacht den Einsatz in der Entwicklung für die Industrie. Die wissenschaftlichen Erkenntnisse werden in die interne Norm überführt werden.

### Zündfähigkeit von Teilentladungen

Im Gegensatz zu Funkenentladungen bildet sich bei Büschel-, Oberflächen- oder Teilentladungen kein leitfähiger Kanal zwischen den zwei Elektroden aus. Die elektrische Entladung entsteht durch lokale Feldüberhöhungen und wird kapazitiv über die Konfiguration der Anordnung oder durch akkumulierte Ladungsträger gespeist (elektrostatische

Aufladungsprozesse). Ein typisches Beispiel für lokale Feldüberhöhungen sind Isolationssysteme von elektrischen Geräten wie elektrische Motoren. Im Wickelkopf einer Hochspannungsmaschine treten zwischen den isolierten Phasen sowie zwischen isolierter Phase und dem geerdeten Blechpaket Teilentladungen auf, die potenziell zündfähig sind. Da weder die Spannung noch der Strom dieser Teilentladungen direkt gemessen werden kann, kommen Teilentladungsmesssysteme zum Einsatz. Bild 6 zeigt die Teilentladungen in Abhängigkeit der Phasenlage der Netzspannung über einen Zeitraum von 30 s. Jeder Punkt entspricht einer Teilentladung. Die Ladungsmenge (hier in nC) und die Häufigkeitsverteilung zeigt, dass die Frage zu beantworten ist, ob eine kritische Entladung oder die Akkumulation vieler Entladungen maßgeblich ist. Zur Bestimmung der Zündfähigkeit werden entsprechende Isolationssysteme in brennbaren Gas-/Luftgemischen getestet. Erste Ergebnisse lassen vermuten, dass Ladungsmengen vergleichbar der Bestimmung der Grenzwerte elektrostatischer Entladungen als kritisch angesehen werden können.

Bild 7: Zeitlicher Verlauf der Emission einer elektrischen Entladung bei 111 µJ Energie



### Untersuchungen zum Temperaturfeld elektrischer Entladungen

Die Mindestzündenergie von elektrischen Entladungen wird durch die gespeicherte Energie in einem Kondensator bestimmt, die ein Gas-/Luftgemisch infolge der Funkenentladung entzündet. Da sich die elektrische Energie über den Spannungs- und Stromverlauf bestimmen lässt, kann die Messung der Temperatur der Funkenentladung durch optische Emissionsspektroskopie die Zusammenhänge über zündungsrelevante Prozesse aufzeigen. Dadurch entsteht das Verständnis über die Mechanismen, die sich in einem Funkenmodell beschreiben lassen. Bild 7 zeigt die Emission einer Funkenentladung zwischen zwei Elektroden in Abhängigkeit der Zeit. Nach spektraler Zerlegung des Lichts kann hieraus die Temperatur bestimmt werden.

Darüber hinaus haben die Untersuchungen gezeigt, dass durch die elektrische Entladung erzeugte Ionen und Radikale die Zündung und die sich anschließende Verbrennung beeinflussen.

### Zusammenfassung und Ausblick

Grundlage einer sicherheitstechnischen Bewertung von elektrischen Entladungen ist die Bestimmung der Grenzwerte anhand praktisch messbarer Größen, die von den Entladungsformen bei unterschiedlichen Anwendungsfällen abhängen.

Die Berechnung von Verbrennungsprozessen anhand von Temperaturfeldern wurde innerhalb einer DFG-Forschergruppe untersucht. Das Verständnis der elektrischen Entladung und die Entstehung eines Temperaturfeldes sollen als Grundlage für numerische Simulationen dienen, die dann wiederum zur Berechnung der Verbrennung genutzt werden kann.

Ein daraus zu entwickelndes Funkenmodell kann bei der Bestimmung der Zündgrenzkurven in der Zündschutzart Eigensicherheit „i“, von Grenzwerten von elektrostatischen Entladungen oder von Teilentladungen zur Vereinfachung der Bewertung von explosionsgeschützten Geräten sehr hilfreich sein.

## In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

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

### Grundlagen der Metrologie

#### Weitere Fortschritte bei der Verringerung der Messunsicherheit der molaren Masse des isotopisch angereicherten Siliziums für das „Avogadro-Projekt“

Durch diverse experimentelle, mathematische und präparative Optimierungen wurde im Zusammenspiel mit der kontinuierlich verbesserten Anreicherung des Isotops  $^{28}\text{Si}$  in den verwendeten Silizium-Materialien die relative Messunsicherheit der molaren Masse in den letzten fünf Jahren um nahezu eine Größenordnung auf zuletzt unter  $10^{-9}$  abgesenkt. (A. Pramann, O. Rienitz, FB 3.1, [axel.pramann@ptb.de](mailto:axel.pramann@ptb.de), [olaf.rienitz@ptb.de](mailto:olaf.rienitz@ptb.de))

#### CCQM-Studie zur Messung von Wachstumshormon gestartet

Die PTB organisiert als Pilotlabor einen Ringvergleich nationaler Metrologieinstitute zur Demonstration von Eignung und Zuverlässigkeit der Massenspektrometrie als Referenzmethodenprinzip für Protein-Biomarker in klinischen Proben. Erstmals wird ein Primärmethodenprinzip (massenspektrometrische Isotopenverdünnung, ID-MS) für die Quantifizierung von Proteinen hinsichtlich internationaler Vergleichbarkeit evaluiert. Damit soll die SI-Rückführbarkeit auf entsprechendem Niveau verbessert und die Technik für Proteine als wichtige klinische Marker etabliert werden. (C. Arsene, FB 3.1, [christian.arsene@ptb.de](mailto:christian.arsene@ptb.de))

#### Untersuchung spektroskopischer Methoden zur Messung des absoluten Isotopenverhältnisses von $\text{CO}_2$

Im Zusammenhang mit der Bearbeitung des EMRP-Projekts „Metrology for high-impact greenhouse gases (HIGHGAS)“ wurden in der AG 3.22 spektroskopische Systeme zur Bestimmung des absoluten  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ -Isotopenverhältnisses in  $\text{CO}_2$  evaluiert. (J. Nwaboh/O. Werhahn, FB 3.2, [olav.werhahn@ptb.de](mailto:olav.werhahn@ptb.de))

#### Bestimmung spektraler Referenz-Linienparameter von Molekülen: *EUMETRISPEC*

Im Rahmen der Bestimmung spektraler Linienparameter wurde eine neue Auswerteprozedur, die über sogenannte Hartman-Tran-Profile auch Stoßverbreiterungsmechanismen höherer Ordnung modellieren kann (z. B. Line-Mixing, Dicke-Narrowing), auf gemessene HCl-Spektren angewendet

und HCl-Verbreiterungskoeffizienten für Stöße mit Fremdmolekülen wie  $\text{CO}$  und  $\text{CO}_2$  bestimmt. Die Messunsicherheit konnte dabei gegenüber Literaturwerten deutlich reduziert werden. Die Bestimmung von Verbreiterungskoeffizienten anderer Stoßpartner wie  $\text{H}_2$  oder  $\text{CH}_4$  ist in Arbeit. Neue, mit der FT-Facility gemessene Spektren von reinem Sauerstoff und Sauerstoff in Stickstoff sollen zur Validierung des Mess- und Auswerteprozesses genutzt werden. Die FT-Facility der AG wurde durch die Beschaffung eines zweiten FT-Spektrometers für den UV-VIS-NIR-Bereich ergänzt und soll 2017 *EUMETRISPEC* ergänzen und in neue EMPIR-Projekte eingebracht werden. (G. Li/A. Lüttschwager/Jens Brunzendorf/V. Ebert, FB 3.2, [volker.ebert@ptb.de](mailto:volker.ebert@ptb.de))

#### Ein neuer Ansatz zur Synchronisierung wirksamer Querschnittsflächen von Druckwaagen

Ein neuer, auf der Methode der gewichteten kleinsten Quadrate basierender Ansatz wurde entwickelt, um die wirksamen Querschnittsflächen von primären Druckwaagen zu synchronisieren. Durch dieses Verfahren können die wirksamen Querschnittsflächen von dimensionell charakterisierten Kolben-Zylinder-Systemen bestimmt werden, die die beste Übereinstimmung mit den Querschnittsflächen-Verhältnissen aus Druckmessungen liefern. Das Verfahren wurde auf die PTB-Gas- und Ölprimärdruckwaagen sowie auf die State-of-the-art-Druckwaagen angewandt, die in den Experimenten zur Neubestimmung der Boltzmann-Konstante verwendet werden. Damit konnte die Messunsicherheit der Druckskala in Gasen und Flüssigkeiten verringert und die bisher niedrigste Messunsicherheit unter 1 ppm von Druckmessungen in gasförmigen Medien bis zu 7 MPa erreicht werden. (W. Sabuga, FB 3.3, [wladimir.sabuga@ptb.de](mailto:wladimir.sabuga@ptb.de))

#### Alterungsmodellrechnungen von Li-Ionenbatteriezellen implementiert

In Zusammenarbeit mit der TU Braunschweig hat die PTB ein mathematisches Modell elektrochemischer Impedanzspektren von Li-Ionenbatteriezellen implementiert. Die Simulationsrechnungen flankieren den Referenzmessplatz der PTB zur Bestimmung des Gesundheitszustands solcher Zellen, indem sie deren Alterungsverhalten nachbilden. (S. Seitz, FB 3.4, [steffen.seitz@ptb.de](mailto:steffen.seitz@ptb.de))

## Metrologie für die Gesellschaft

### Qualitätskontrolle in der medizinischen Diagnostik – Charakterisierung von Protein-Modifikationen

Das Uniklinikum Regensburg entwickelt einen immunologischen Assay, mit dem das körpereigene Abwehrsystem gegen das humane Zytomegalievirus analysiert werden kann. Vor allem bei immunsupprimierten Patienten kann das Level der Abwehrzellen einen kritischen Wert unterschreiten und so die Reaktivierung des Virus begünstigen. Kern der durchgeführten Diagnostik ist ein chemisch verändertes Virus-Protein. Dessen Modifikationsgrad und -muster wird mithilfe verschiedener massenspektrometrischer Methoden eingehender untersucht. (B. Reisinger, FB 3.1, bernd.reisinger@ptb.de)

### Neues EMPIR-Projekt zur Rolle von Metallen und Metallproteinen in neurodegenerativen Erkrankungen (15HLT02)

Mit einem Stakeholder-Meeting und dem Kick-off-Meeting wurde das EMPIR-Projekt ReMiND erfolgreich gestartet. Ziel ist die Entwicklung von Referenzmessverfahren, mit denen verschiedene Biomarker zur Diagnose der Alzheimer-Erkrankung in biologischen Proben wie Cerebrospinalflüssigkeit oder Hirnhomogenat gemessen werden können. (C. Swart, FB 3.1, claudia.swart@ptb.de)

### Absolutes CO-Laser-Spektrometer für EMRP-Projekte

Die im Rahmen der EMRP-Projekte „Metrology for high-impact greenhouse gases“ (ENV52-HIGH-GAS) und „Metrology for biogas“ (ENG54-BIO-GAS) in AG 3.22 entwickelte Laser-Spektrometer-Familie für absolute CO-Konzentrationsmessungen (Stoffmengenanteile) in Luft- bzw. Biogas-Matrix wurden mithilfe metrologischer Gasstandards aus Partnerinstituten in Frankreich und Großbritannien erfolgreich validiert. Ohne Kalibrierung mit einem Referenzgas, nur auf Basis hochgenauer CO-Spektraldaten, liegen die Abweichungen des Laserspektrometers gegenüber den Gasstandards im Konzentrationsbereich von 300 nmol/mol CO bis 1000 µmol/mol bei unter 1 % (relativ) und damit innerhalb der Messunsicherheit des Spektrometers. Das so arbeitende Spektrometer soll als messtechnische Basis zukünftiger optischer Gasstandards dienen, die zukünftig in Druckgasflaschen abgefüllte Gasstandards ergänzen, um z. B. In-situ-Kalibrierungen ohne Verwendung von Prüfgasen zu ermöglichen. (J. Nwaboh/O. Werhahn, FB 3.2, olav.werhahn@ptb.de)

### EMRP-Projekt „Metrology for ammonia in ambient air“ (ENV55-MetNH3) auf der Zielgeraden

Zur Qualifizierung eines Cavity-Ring-Down-Spektrometers als spektroskopischer Standard für die Messung von Ammoniak im Bereich bis 500 nmol/mol (ppb-Bereich) in Luft wurden in der AG 3.22 molekulare Spektralparameter von Ammoniak gemessen. Die in 3.22 entwickelte Auswertemethode ermöglicht es damit, aus den gemessenen Ammoniakspektren direkt einen Stoffmengenanteil zu bestimmen. Eine Voraussetzung war dabei, die Messunsicherheit der gemessenen Spektralparameter gegenüber bisherigen Literaturdaten deutlich zu verbessern. Die relative Messunsicherheit spektroskopischer Absolutmessungen von Ammoniak in Luft liegt damit im Bereich weniger Prozent. Zur Validierung des spektroskopischen Standards wurden laborgestützte Vergleichsmessungen sowie Feldmessungen durchgeführt. (N. Lüttschwager/A. Pogány/O. Werhahn, FB 3.2, olav.werhahn@ptb.de)

### EMPIR-14SIP03-Autopart „Automotive particle emissions: dissemination of aerosol measurement expertise to users and standards bodies“

Im Rahmen des Projektes wurden auf zwei PMP-Meetings die Ergebnisse aus dem ENV02-Projekt vorgestellt und erläutert, sodass ein wesentliches Projektziel erfüllt werden konnte. Parallel wurde wichtigen Stakeholdern aus der Automobilindustrie eine Übersicht über den bevorstehenden Kalibrierservice der Abgas-Partikelzähler an der PTB gegeben. Die zusätzliche PTB-Teilnahme an einem wichtigen Ringvergleich verschiedener industrieller Kalibrierlabore für Abgas-Partikelzähler unter der Federführung der JRC in Ispra, die auch die Leitung des PMP-Gremiums innehat, erlaubte es darüber hinaus, die Arbeiten der Aerosol-AG 3.23 weiter mit den Industriearbeiten zu verschränken. (V. Ebert, FB 3.2, volker.ebert@ptb.de)

### Erfolgreicher Abschluss der DFG-Forschergruppe FOR1447

Eine numerische Beschreibung der Zündung von explosionsfähigen Brennstoff-/Luft-Gemischen benötigt Kenntnisse über physikalische und chemische Vorgänge über mehrere Zeit- und Längenskalen. Die Entwicklung eines umfassenden numerischen Modells wurde durch die deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen der Forschergruppe FOR1447 „Safety Relevant Ignition Processes“ über einen Zeitraum von sechs Jahren gefördert. Beteiligt waren Wissenschaftler der PTB, der Universität Magdeburg und des Karlsruher Instituts für Technologie. Die Ergebnisse der einzelnen Projekte von PTB, der Universität Magdeburg und dem Karls-

ruher Institut für Technologie wurden im Rahmen eines internationalen Workshops unter Beteiligung eingeladener Vortragender der Öffentlichkeit vorgestellt. (D. Markus, FB 3.5, detlev.markus@ptb.de)

### **Abschluss der Ex-Ringvergleichsprogramme „Electrostatic Charge“ und „Intrinsic Safety“**

Die Ex-Ringvergleichsprogramme „Electrostatic Charge“ und „Intrinsic Safety“ mit insgesamt 67 teilnehmenden internationalen Ex-Prüflaboratorien konnten erfolgreich abgeschlossen werden. Die Ergebnisse wurden anschließend mit den Teilnehmern auf den viertägigen PTB-Workshops intensiv diskutiert. Dabei wurden Schwierigkeiten bei der Umsetzung der Prüfmethode der entsprechenden Standards sowie mögliche Verbesserungen aufgezeigt. Insgesamt fanden dafür 93 internationale Fachexperten ihren Weg in die PTB. Die daraus resultierenden Erkenntnisse helfen die Anwendung der Prüfmethode zu verbessern, die Normung zu unterstützen und die Kompetenz der Ex-Prüflaboratorien insgesamt zu fördern. (T. Krause, FB 3.5, tim.krause@ptb.de)

### **Zündwirksamkeit von heißen Oberflächen in Reibkontakten**

Mechanische Funken in Reibkontakten dürfen nicht alleinstehend betrachtet werden. In der Praxis wird heute noch in vielen Fällen davon ausgegangen, dass unterhalb einer Relativgeschwindigkeit von 1 m/s keine Funken entstehen und deshalb keine wirksame heiße Oberfläche vorliegen kann. Diese Schlussfolgerung ist so nicht zulässig, da die Voraussetzung unter keinen Umständen haltbar ist und die Relativgeschwindigkeit für die Bewertung allein keinesfalls ausreicht. (M. Beyer, FB 3.7, michael.beyer@ptb.de)

### **Internationale Normen für explosionsgeschützte mechanische Geräte – ISO 80079-36 und -37**

Die beiden Normen ISO 80079-36 und ISO 80079-37 (Nichtelektrische Geräte für den Einsatz in explosionsfähigen Atmosphären) beschreiben die Anforderungen an explosionsgeschützte mechanische Geräte. Die Normen schaffen erstmals die Voraussetzung für die internationale Anwendung. Sie wurden unter maßgeblicher Beteiligung von PTB-Mitarbeitern erarbeitet. (M. Beyer, FB 3.7, michael.beyer@ptb.de)

### **Detonationen in Kapillaren**

Die Mikroreaktionstechnik bei chemischen Verfahren verwendet Kapillaren mit einem maximalen Durchmesser von 1,0 mm. Es konnte gezeigt werden, dass, wie schon bei Brennstoff-/Sauerstoff-Gemischen, auch für Brennstoff-/N<sub>2</sub>O-Gemischen mit-

hilfe der Detonationszellbreite und der  $\lambda/3$ -Regel sichere Durchmesser ermittelt werden können, die Detonationen durch die Kapillaren verhindern. (E. Brandes, FB 3.7, elisabeth.brandes@ptb.de)

### **Explosionsbereiche mit unterschiedlichen Inertgasen – Vergleich zwischen experimentell bestimmten und berechneten Daten**

Aufgrund ihrer unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität führt die Zugabe von Inertgasen zu Brennstoff-/Luft-Gemischen zu unterschiedlichen Explosionsbereichen. Der Vergleich experimentell bestimmter Explosionsbereiche mit berechneten zeigte eine gute Übereinstimmung. (E. Brandes, FB 3.7, elisabeth.brandes@ptb.de)

### **Untersuchung zur Druckabhängigkeit der Anlaufflänge von Detonationen in Rohrleitungen**

Für den Explosionsschutz bei nicht-atmosphärischen Bedingungen ist neben einer differenzierten Kenntnis der sicherheitstechnischen Kenngrößen unter diesen Bedingungen auch die Kenntnis über den veränderten Ablauf von Explosionen wichtig. Der effiziente Einsatz von Flammendurchschlagsicherungen erfordert die Abschätzung der möglichen Anlaufflänge einer Detonation unter diesen veränderten Bedingungen. Im Rahmen einer systematischen Untersuchung wurde der Einfluss des Anfangsdruckes bzw. der Anfangsdichte auf die Anlaufflänge von Detonationen untersucht. (F. Stolpe, FB 3.7, frank.stolpe@ptb.de)

### **Gesetzliche Grundlagen des Explosionsschutzes**

Im Februar 2015 erschien eine Neufassung der Betriebssicherheitsverordnung, in der die Aspekte der Bereitstellung der Arbeitsmittel deutlicher hervorgehoben wurden. Gleichzeitig wurden die Explosionsschutzanforderungen aus der Betriebssicherheitsverordnung herausgelöst und in die Gefahrstoffverordnung überführt. Dies führt zu einer Vielzahl von Veränderungen im Explosionsschutz. (D.-H. Frobese, FB 3.7, dirk-hans.frobese@ptb.de)

### **Neufassung der TRBS 3151/TRGS 751**

Im Oktober 2012 erschien die TRBS 3151/TRGS 751, die Anforderungen zur Vermeidung von Brand-, Explosions- und Druckgefährdungen an Tankstellen und Füllanlagen zur Befüllung von Landfahrzeugen enthält. In der praktischen Anwendung dieser Technischen Regel ergaben sich Fragen, die eine Überarbeitung der Technischen Regel erforderlich machten. Gleichzeitig wurde die TRBS 3151/TRGS 751 an die Novelle der Betriebssicherheitsverordnung und die Änderung der Gefahrstoffverordnung

vom 3. Februar 2015 angepasst. (D.-H. Frobese, FB 3.7, dirk-hans.frobese@ptb.de)

### **Tankreinigungskonzept mit personenlos bewegtem Roboter**

Das Tankreinigungs- und Inspektionsgerät dient zur visuellen Prüfung und ferngesteuerten Reinigung in Tanks bei gleichzeitig langfristig, häufig oder ständig vorhandener explosionsfähiger Atmosphäre (Zone 0). Dieser Einsatz setzt eine umfassende Bewertung der Zündgefahren voraus. Die Explosionsschutzrichtlinie 2014/34/EU (ATEX) schreibt für Geräte, die bestimmungsgemäß in explosionsgefährdeten Bereichen eingesetzt werden, die Vermeidung von wirksamen Zündquellen vor. Hieraus ergeben sich diverse Zündschutzmaßnahmen, von denen eine Maßnahme beispielhaft vorgestellt werden soll. (M. Himstedt, FB 3.7, matthias.himstedt@ptb.de)

### **Aufladbarkeit von organischen Lösemitteln beim Rühren in Behältern**

In der industriellen Praxis besteht immer mehr die Notwendigkeit, elektrostatisch geschützte Kombinations-IBC aus Polyethylen von 1 m<sup>3</sup> Fassungsvermögen (RIBC) für die Bereitstellung entzündbarer Gemische und Suspensionen, die ein kontinuierliches Rühren erfordern, einzusetzen. Die BG RCI hat deshalb in einem Forschungsvorhaben von der PTB experimentell untersuchen lassen, wie groß die hierbei entstehenden elektrostatischen Zündgefahren tatsächlich sind. Hierzu wurden umfangreiche Rührversuche verschiedener Lösemitteln und Suspensionen in verschiedenen Behältern durchgeführt. (U. von Pidoll, FB 3.7, ulrich.v.pidoll@ptb.de)

### **Elektrostatische Aufladungen bei der Spritzbefüllung von Behältern**

Das Befüllen eines Containers mit brennbaren Flüssigkeiten ist ein häufiger Prozess in der chemischen und der Mineralölindustrie. In vielen Fällen wird der Container mittels eines Rohrs befüllt, das in einem gewissen Abstand über dem Boden endet. Bisher ist wenig bekannt, ob und – wenn ja – wie viel elektrostatische Aufladung bei dieser Art der Befüllung („Spritz-Befüllung“, „splash-filling“) gebildet wird. (U. von Pidoll, FB 3.7, ulrich.v.pidoll@ptb.de)

## **Metrologie für die Wirtschaft**

### **EMRP-Projekt „Metrology for airborne molecular contamination in manufacturing environments“ (IND63 MetAMC) erfolgreich abgeschlossen**

Nach dreijähriger Bearbeitungszeit hat die AG 3.22 ihre Arbeiten für das MetAMC-Projekt zur Detektionen kleinster Mengen luftgetragener molekularer Verunreinigungen, z. B. in Reinräumen, basierend auf photoakustischer (PAS) sowie der sogenannten Cavity-enhanced Spektroskopie (CEAS) abgeschlossen. Dies beinhaltete die Entwicklung, die metrologische Charakterisierung, den Feldeinsatz sowie den projektweiten Vergleich der Methoden zur Spurendetektion von Ammoniak in Luft im Bereich weniger nmol/mol. Eine Zusammenfassung des Projekts ist unter <https://www.ptb.de/emrp/ind63-home.html> einsehbar. (N. Lüttschwager/O. Werhahn, FB 3.2, olav.werhahn@ptb.de)

### **EMRP-Projekt „Metrology to underpin future regulation of industrial emissions“ (ENV60-IMPRESS): Diodenlaserspektroskopie zur Überwachung industrieller Emissionen**

Anthropogene Emissionen aus Schornsteinen und flächigen Arealen wie Mülldeponien sind der Hintergrund des Engagements von AG 3.22 im EMRP-Projekt IMPRESS ENV60. Hierbei werden die Möglichkeiten von Open-Path-Tunable-Diode-Laser-Absorption-Spektroskopie (TDLAS) metrologisch bewertet. Laborexperimente in Zellen und Open-Path-Messungen im Gelände über mehrere 10 m bis 100 m Distanz wurden durchgeführt und dabei z. B. auch die Einflüsse von räumlicher Heterogenität und Variabilität getestet. (Z. Qu/V. Ebert /O. Werhahn, FB 3.2, olav.werhahn@ptb.de)

### **Kooperationsprojekt PTB-AVL „Erzeugung von Diesel und Propanruß mittels Diffusionsflammen und Vergleich ihrer Eignung als motorischen Verbrennungsprozessen analoges Kalibriereraerosol“**

Das im Januar 2015 gestartete Kooperationsprojekt zwischen der PTB und der AVL-List GmbH ist in diesem Jahr mit der Charakterisierung und dem Umbau eines Dieselrußgenerators an der PTB sowie mit Messungen am Rollenprüfstand der AVL List GmbH in die nächste Projektphase eingetreten. (M. Hildebrandt/V. Ebert, FB 3.2, volker.ebert@ptb.de)

## **Nicht-newtonsche Referenzmaterialien für Schmiermittel bei Tiefbohrungen**

Die PTB entwickelt zusammen mit Partnern aus der Mineralölindustrie, von NMIs und Messgeräteherstellern im Rahmen des EMRP-Projektes ENG59 NNL (Sensor development and calibration method for inline detection of viscosity and solids content of non-Newtonian liquids) nicht-newtonsche Referenzflüssigkeiten. Ziel ist die anwendungsnahe Kalibrierung von Sensoren, die die Eigenschaften der bei Erdbohrungen verwendeten Schmiermittel überwachen. In der jetzt abgeschlossenen ersten Phase des Projekts wurden die viskosen, plastischen und elastischen Eigenschaftsprofile von Testflüssigkeiten gezielt eingestellt, um die Eigenschaften der Schmiermittel nachzubilden. Derzeit läuft die zweite Phase, in der die bisher maßgeblich von NMIs im Labor validierten Rückführungs- und Messunsicherheitskonzepte von allen Projektpartnern in die Praxis überführt werden. An den in ENG59NNL entwickelten Referenzflüssigkeiten haben bereits Anwender, Normungsausschüsse und Messgerätehersteller aus der Lack- und Farbenindustrie großes Interesse bekundet. (R. Pagel, FB 3.3, ronald.pagel@ptb.de)

## **Anwendung der Interferometrie zur Charakterisierung von thermochemischen Zündungen durch elektrische Entladungen zwischen bewegten Kontakten bei niedrigen Spannungen und Strömen**

In Zusammenarbeit mit der „Graduate Aeronautics Laboratories, California Institute of Technology“ (GALCIT) wurden erste interferometrische Untersuchungen des Zündprozesses mit hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung (200 000 fps, 130 px/mm) erfolgreich durchgeführt. Diese Untersuchungen ermöglichen eine bisher nicht mögliche quantitative Beurteilung der thermochemischen Zündung, was für diesen Anwendungsbereich ein Novum ist.

Die Bewertung der Zündgefahren durch Entladungen bei niedrigen Spannungen ( $< 50$  V) und niedrigen Strömen ( $< 1$  A) hat eine große Bedeutung im Explosionsschutz. Die Lösung dieser Problemstellung mit neuen wissenschaftlichen Ansätzen ist ein momentanes Kernthema der Arbeitsgruppe 3.62. Ein Teil der dazu notwendigen Untersuchungen besteht in der Entwicklung von reaktiven Strömungssimulationen, mit denen solche Zündgefahren bewertet werden können. Quantitative Messergebnisse basierend auf Interferometrie sind ein wichtiger Schritt zur Validierung dieser Simulationen. (R. Shekhar, FB 3.6, rajiv.shekhar@ptb.de)

## **Erfolgreiche Erprobung eines Verfahrens zur Messung der frequenz- und temperaturabhängigen magnetischen Eigenschaften an nicht kornorientierten Elektroblechen zur Verwendung in elektrischen Maschinen**

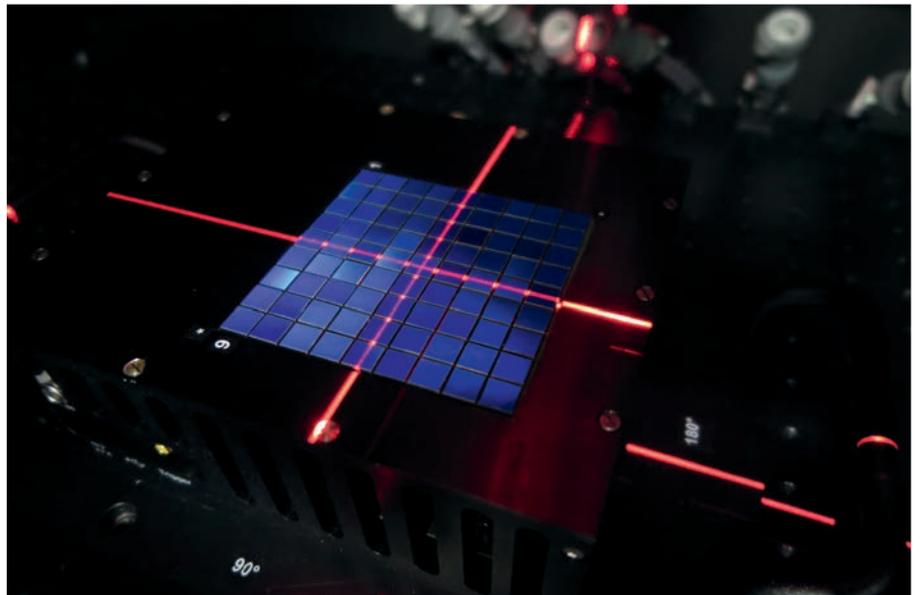
Ein Versuchsaufbau zur Ermittlung der magnetischen Eigenschaften von nicht kornorientierten Elektroblechen im Frequenzbereich bis zu 12 kHz und im Temperaturbereich bis 250 °C wurde entwickelt und erfolgreich erprobt. Die nicht kornorientierten Bleche werden üblicherweise in drehenden elektrischen Maschinen eingesetzt.

Es konnte dabei gezeigt werden, dass bei der Frequenz 50 Hz und Raumtemperatur (Referenzpunkt) die ermittelte B-H-Kennlinie des Materials sehr gut mit den Herstellerangaben übereinstimmt und nahezu deckungsgleich mit den Ergebnissen der Messung im Epstein-Rahmen, einem etablierten Standard-Messverfahren für die magnetischen Eigenschaften von Elektroblechen, ist. (C. Lehrmann, FB 3.6, christian.lehrmann@ptb.de)



# Abteilung 4

## Optik



Die Abteilung *Optik* der PTB ist der Einheitlichkeit, Verlässlichkeit und dem Fortschritt im optischen Messwesen verpflichtet. Nach dem Einheiten- und Zeitgesetz realisiert die Abteilung – ausgehend von den Basiseinheiten Candela, Meter und Sekunde – unterschiedliche abgeleitete Einheiten und gibt sie mit angemessener Genauigkeit an ihre Kunden in Industrie und Gesellschaft weiter. Die bearbeiteten Aufgaben lassen sich vorwiegend den Themenbereichen *Photometrie und Radiometrie*, *Länge und Dimensionelles* und *Zeit und Frequenz* zuordnen. Den Themenbereich *Photometrie und Radiometrie* bearbeitet die Abteilung *Optik* gemeinsam mit der Abteilung *Temperatur und Synchrotronstrahlung*, *Länge und Dimensionelles* gemeinsam mit der Abteilung *Fertigungsmesstechnik*. In der Abteilung *Optik* wird die Arbeit in den vier Fachbereichen *Photometrie und angewandte Radiometrie*, *Bild- und Wellenoptik*, *Quantenoptik und Längeneinheit* sowie *Zeit und Frequenz* organisiert. Das *QUEST-Institut an der PTB*, das in enger Zusammenarbeit mit der Leibniz Universität Hannover entstanden ist, betreibt vorwiegend Forschung, die dem Themenbereich *Zeit und Frequenz* zuzuordnen ist. Einige im Berichtszeitraum behandelte Schwerpunkte und Beispiele aus den verschiedenen Themenbereichen werden im Folgenden vorgestellt.

### Photometrie und Radiometrie

Für die Umweltüberwachung und Klimaforschung werden vorzugsweise optische Methoden zur metrologischen Bestimmung von unterschiedlichen physikalischen Größen benutzt, um verlässliche Daten über relevante Zeiträume mit hinreichend kleiner Unsicherheit und dennoch kostengünstig zu ermitteln. Ozon ist eines der wichtigsten Spurengase in der Atmosphäre, und die Kenntnis seiner Verteilung ist für die Gesundheit der Menschen wie für Klimamodelle unabdingbar.

Die PTB beteiligte sich dazu im Forschungsprojekt ATMOZ des Europäischen Metrologie-Forschungsprogramms (EMRP) an der Rückführbarkeit der Messung der atmosphärischen Gesamtozonsäule. Bei einer Messkampagne auf Teneriffa am Izaña-Observatorium für Atmosphärenforschung wurden Vergleichsmessungen mit unterschiedlichen Instrumenten durchgeführt. So wurden mit einem Fourier-Transform-Spektrometriemeter höchstauflösende Messungen der direkten solaren spektralen

Bestrahlungsstärke durchgeführt (s. Bild 1). Über die sogenannte Langley-Extrapolationsmethode konnte das relative extraterrestrische Spektrum im Spektralbereich von 305 nm – 380 nm mit einer Auflösung von  $< 0,02$  nm bestimmt werden. Dazu wurde eine Sonnennachführungseinheit mit einem speziell angepassten Monitor-Filterradiometer aufgebaut, da die solaren UV-Spektren in Abhängigkeit vom Sonnenstand, d. h. der Wegstrecke der solaren Strahlung durch die Atmosphäre, gemessen werden müssen. Dieses Referenzspektrum dient als Grundlage für präzise Messungen zur Bestimmung der Ozonsäule mittels der etablierten UV-Spektrometriemeter. Für eine weitere Messkampagne am Izaña-Observatorium wurde ein modifiziertes kompaktes Array-Spektrometriemeter umfangreich charakterisiert. Damit wurden täglich zwischen Sonnenaufgang und -untergang bis zu 5000 Spektren aufgenommen. Aus den Messergebnissen der direkten solaren Bestrahlungsstärke im UV-Spektralbereich konnte dann mithilfe von Strahlungsmodellen die Dicke der Ozonsäule in der Atmosphäre ermittelt werden. Die Ergebnisse wurden mit den Resultaten der klassischen Messverfahren mit Dobson- und Brewer-Spektrophotometern verglichen. Dabei ergab sich eine hohe Übereinstimmung der ermittelten Ozonschichtdicken mit Abweichungen von teilweise deutlich unter 2 %. Es wurde somit bestätigt, dass ein speziell angepasstes Array-Spektrometriemeter für atmosphärische Strahlungsmessungen geeignet und vielseitig einsetzbar ist.

Neben der Solarzellenmetrologie für die Energieerzeugung auf der Erde werden besondere Solarzellen zur Energieversorgung von Satelliten im Welt- raum eingesetzt. Sie bestehen heutzutage aus drei (später sechs) epitaktisch übereinander gewachsenen, in Serie verschalteten Sub-Solarzellen. In der PTB wurde innerhalb des EMRP-Projekts SolCell ein Leuchtdioden-(LED)-basierter Solarsimulator (s. Bild 2) entwickelt, um die Charakterisierung und Kalibrierung der nächsten Generation von Mehrschicht-Solarzellen zu ermöglichen. Das verwendete LED-Konzept mit bis zu 64 getrennt regelbaren Wellenlängenbereichen kann zusätzlich mit einer Halogenquelle kombiniert werden. Hiermit kann ein nahezu ideales Solarspektrum außerhalb und innerhalb der Atmosphäre nachgebildet werden.

Bestimmte Effektpigmente, wie sie z. B. für Fahrzeuglackierungen, Kosmetika oder in der Druck- und Papierindustrie verwendet werden, zeigen je nach Beleuchtungs- und Beobachtungswinkel einen unterschiedlichen Farbeindruck. Die quantitative Bestimmung dieser Reflexionseigenschaften stellt

Titelbild:

Solarzellenarray für die Charakterisierung von Sonnensimulatoren

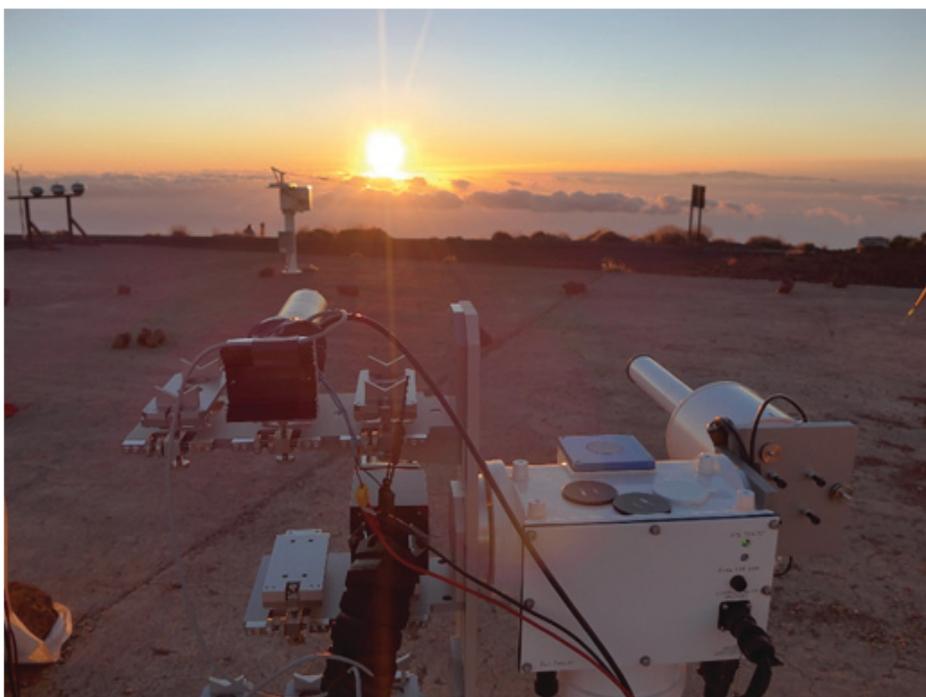


Bild 1: Messung der direkten solaren Bestrahlungsstärke im UV-Spektralbereich am Izaña-Observatorium für Atmosphärenforschung auf Teneriffa im EMRP-Projekt ATMOZ mit Sonnennachführungseinheit und verschiedenen Detektoren

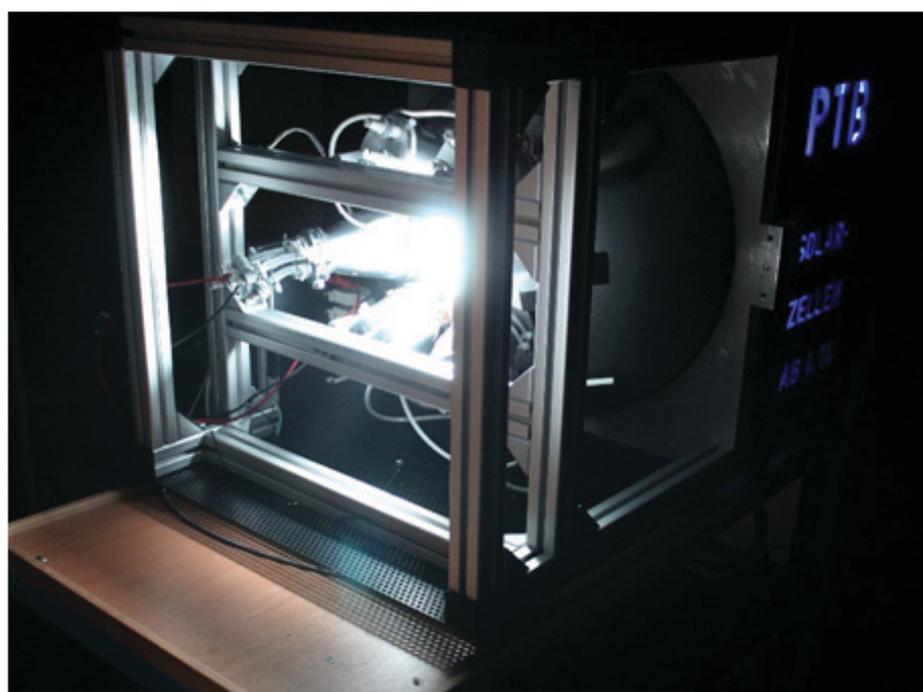
die Messtechnik vor hohe Herausforderungen, da viele Geometrien bei unterschiedlichen Beleuchtungs- und Beobachtungswinkeln in einem großen Wellenlängenbereich gemessen werden müssen. Insbesondere bei kleinen Einfallswinkeln werden die bisher oft vernachlässigten Polarisations-eigenschaften wichtig. Im Berichtszeitraum wurde dazu das Robotergonio-reflektometer der PTB weiterentwickelt und dieser Einfluss an sogenannten stark goniochromatischen Interferenzpigmenten systematisch untersucht. Dabei konnte ein Vorgehen entwickelt werden, das abhängig von Probenart und Geometrie eine Abschätzung darüber erlaubt, wann eine Polarisationsmessung in vollem Umfang not-

wendig ist oder wann ein reduzierter Umfang ausreicht, um eine Kalibrierung effizient durchführen zu können.

### Länge und Dimensionelles

Eine der größten Herausforderungen in der optischen Metrologie besteht in der flächenhaft optischen Formerfassung von Freiformoptiken, die für die Qualitätssicherung in der optischen Industrie benötigt wird. Dazu werden gegenwärtig zwei konkurrierende Messverfahren eingesetzt: interferometrische und geometrisch-optische Methoden. Die Interferometrie bietet hohe Genauigkeit, stellt aber

Bild 2: Leuchtdioden-Solarsimulator zur Charakterisierung von Mehrschicht-Solarzellen. Die Durchmischung der Einzel-LED-Quellen sowie eines Halogenstrahlers erfolgt über eine Ulbrichtkugel.



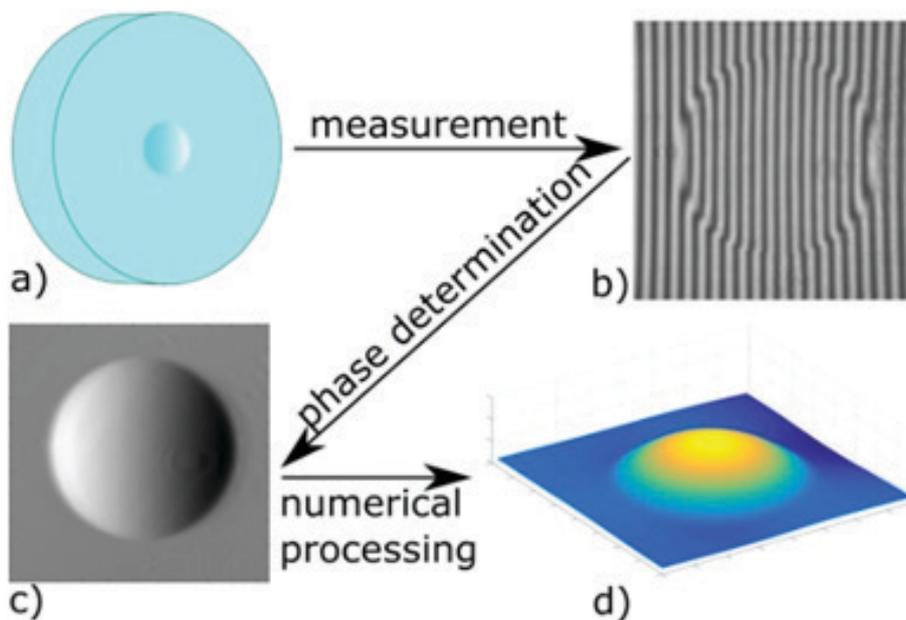


Bild 3: Messprinzip des Scher-Interferometers am Beispiel einer Oberfläche mit einer sphärischen Einprägung von 5 mm Durchmesser und 4  $\mu\text{m}$  Tiefe. a) Zu messende Fläche, b) resultierendes Interferogramm, c) mittels Phasenschiebungsverfahren erzeugte Phasenfläche, d) rekonstruierte Oberflächenform.

auch höchste Anforderungen an das maßgeschneiderte kohärente Wellenfeld, das zur Objektbeleuchtung benötigt wird. Mit einem neuen Ansatz aus der Scher-Interferometrie werden vergleichsweise geringe Anforderungen an die zeitliche und räumliche Kohärenz der Beleuchtung gestellt. Im Rahmen eines von der Deutschen Forschungsgemeinschaft geförderten Projektes wird in einer Kooperation zwischen der PTB und dem Bremer Institut für angewandte Strahltechnik ein solches Scher-Interferometer aufgebaut und untersucht.

Das Objekt wird mit mehreren Lichtquellen (Faserbündel mit LED-Beleuchtung) beleuchtet, deren Positionen individuell an die Prüflingsgeometrie angepasst werden können. Über einen Lichtmodulator als Scherelement wird ein Interferenzmuster auf der Kamera erzeugt. Das Messverfahren (s. Bild 3) wurde an Asphären erprobt und bietet das Potenzial zur Vermessung von Freiformflächen.

Submikrometergroße Mikrovessikel werden von lebenden Zellen in ihre Umgebung abgegeben. Da ihre Zahl, Gestalt und Größe in starkem Maße krankheitsabhängig ist, erhofft man sich von ihrem quantitativen Nachweis eine erhebliche diagnostische Bedeutung. Dafür müssen aber unterschiedliche Messmethoden und verschiedene klinische Laboratorien eine Rückführung der Messsysteme auf das Internationale Einheitensystem (SI) bekommen. In interdisziplinären Arbeitsgruppen wurden daher im Rahmen eines europäischen Forschungsprojekts synthetische Referenznanopartikel entwickelt und untersucht. Zur rückführbaren Größenbestimmung setzte die PTB in der Abteilung *Optik* die scannende Elektronenmikroskopie in Transmission und in der Abteilung *Temperatur*

und *Synchrotronstrahlung* die Röntgenkleinwinkelstreuung an der Synchrotronstrahlungsquelle BESSY II ein. Für die Kalibrierpartikel aus Silica und Polystyrol mit Durchmessern zwischen 50 nm und 250 nm ergab sich eine sehr gute Übereinstimmung der Messergebnisse aus den Metrologieinstituten. Im Ergebnis können jetzt klinische Labors zertifizierte Referenzpartikel erhalten.

### Zeit und Frequenz

Im Einheiten- und Zeitgesetz wurde der PTB die Aufgabe übertragen, in Deutschland die gesetzliche Zeit darzustellen und zu verbreiten. Große Bedeutung hat dabei der Langwellensender DCF77 in Mainflingen nahe Frankfurt, mit dem in ganz Europa über 100 Millionen Empfänger in Uhren und Steuerungen versorgt werden. Das Zeitsignal wird in Mainflingen durch eine dort befindliche Atomuhr und zwei mitlaufende Ersatzuhren erzeugt, die in Braunschweig mittels des dort empfangenen Signals überwacht und geregelt werden. Seit 2016 wird der Gang der sendenden Uhr mit einem kalibrierten Zeitempänger vor Ort überprüft, der die Zeitsignale von GPS- und Galileo-Satelliten nutzt. Dies führt zu kleineren Abweichungen der Phase des ausgesandten Signals. Zusätzlich hat Deutschland damit einen zweiten Standort, an dem die gesetzliche Zeit realisiert wird. Zur Berechnung der koordinierten Weltzeit (Universal Coordinated Time; UTC) tragen die Uhren der PTB und des United States Naval Observatory (USNO) in hohem Maße bei. Die benutzte Messeinrichtung für den dafür notwendigen Zweiweg-Satelliten-Zeitvergleich (TWSTFT) zwischen beiden Instituten muss regelmäßig kalibriert werden (s. Bild 4). Bei der im Berichtszeitraum durchgeführten Kalibrierung wurde

Bild 4: Aufblasbare mobile Zweiweg-Satelliten-Zeit- und-Frequenzübertragungs- (TWSTFT)-Station des US Naval Observatory zur Kalibrierung der Zeitübertragung zwischen der PTB und der GPS Master Clock in Washington DC. Die mobile Station befindet sich neben der Atomuhrenhalle und vor einer festinstallierten TWSTFT-Station der PTB.

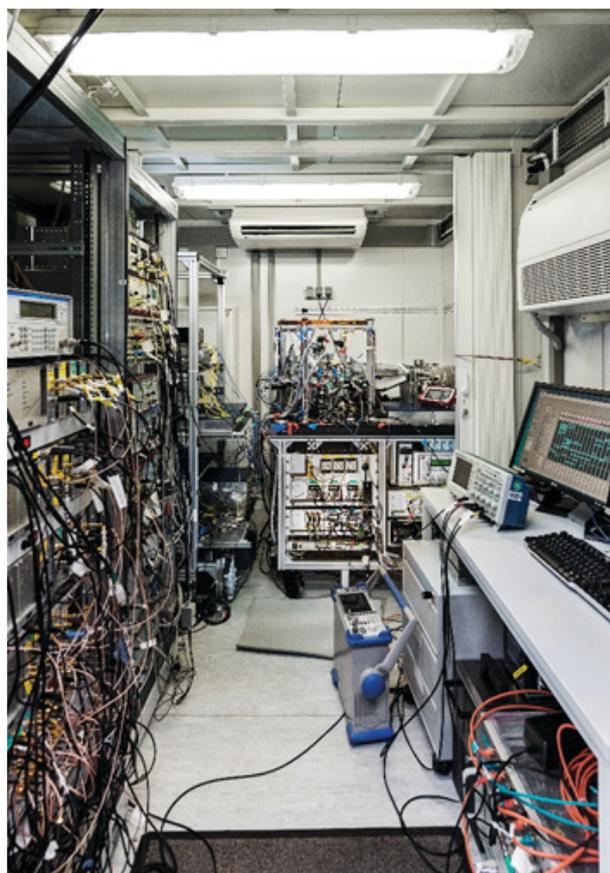


eine Korrektur für die im routinemäßigen Betrieb befindliche TWSTFT-Verbindung von lediglich 0,5 ns ermittelt.

Neben den Zweiweg-Satelliten-Zeitvergleichen bieten spezielle Faserverbindungen für die Telekommunikation eine neuartige genaue Möglichkeit zum Vergleich von Atomuhren. Eine solche Verbindung besteht seit 2015 zwischen dem französischen Staatsinstitut LNE-Syrté und der PTB und wurde bisher für den Vergleich optischer Atomuhren ver-

wendet (s. Nachricht des Jahres). Durch die phasenkohärente optische Frequenzübertragung über eine stabilisierte Telekommunikationsfaser konnte jetzt auch der bislang genaueste Vergleich primärer Cäsium-Fontänenuhren zwischen zwei Metrologieinstituten durchgeführt werden, der nicht mehr durch Unsicherheiten limitiert ist, die durch die Frequenz-

Bild 5a und b: Container mit der transportablen Sr-Gitteruhr im Untergrundlabor Modane (rechts) und Innenansicht mit optischer Uhr und Elektronik (links)



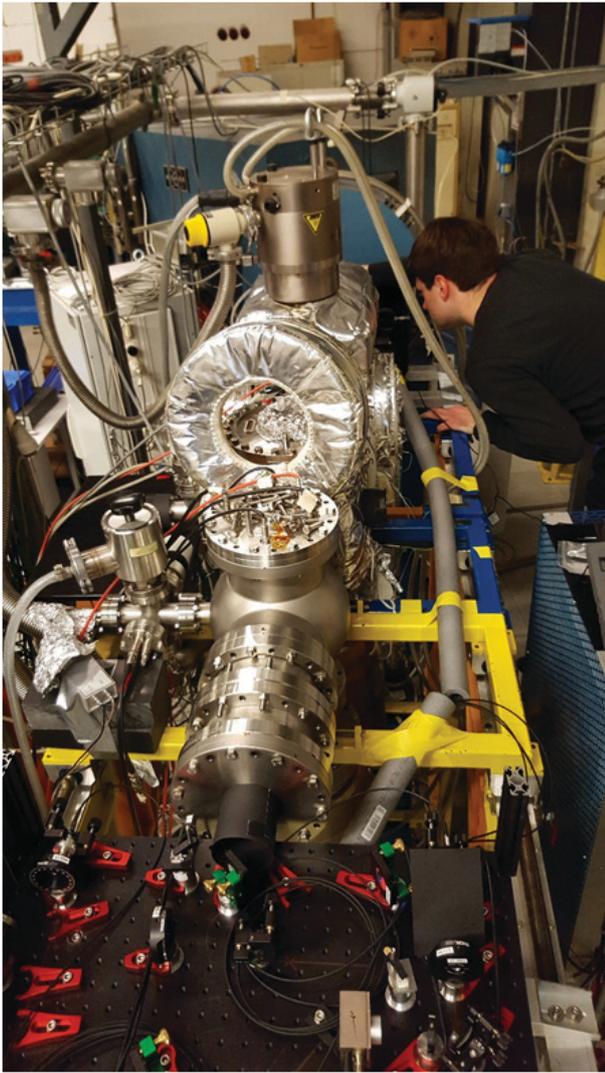


Bild 6: Laseraufbau zur Messung der Hyperfeinstruktur von  $^{229}\text{Th}$  an der Rückstoßionenquelle des Maier-Leibnitz-Laboratoriums der Ludwig-Maximilians-Universität München

übertragung entstehen. Der Vergleich zwischen den Cäsium-Fontänenuhren beider Institute zeigt, dass ihre Frequenzen im Rahmen ihrer Unsicherheiten auf wenige  $10^{-16}$  übereinstimmen. Die besondere Bedeutung des erfolgreichen Vergleichs liegt darin, dass die verglichenen Fontänenuhren die Hauptbeiträge zur Internationalen Atomzeitskala TAI liefern und Grundlage der nationalen Zeitskalen Deutschlands und Frankreichs und einer Vielzahl optischer Frequenzmessungen sind.

Der Vergleich zwischen verschiedenen Instituten kann auch mit transportablen optischen Atomuhren wie der optischen Strontiumgitteruhr, die in der PTB entwickelt wurde, durchgeführt werden (s. Bild 5a und b). Diese transportable Uhr wurde im Berichtszeitraum erstmals in das Untergrundlabor Modane für Messungen des Geopotentials und an das italienische Metrologieinstitut INRIM transportiert.

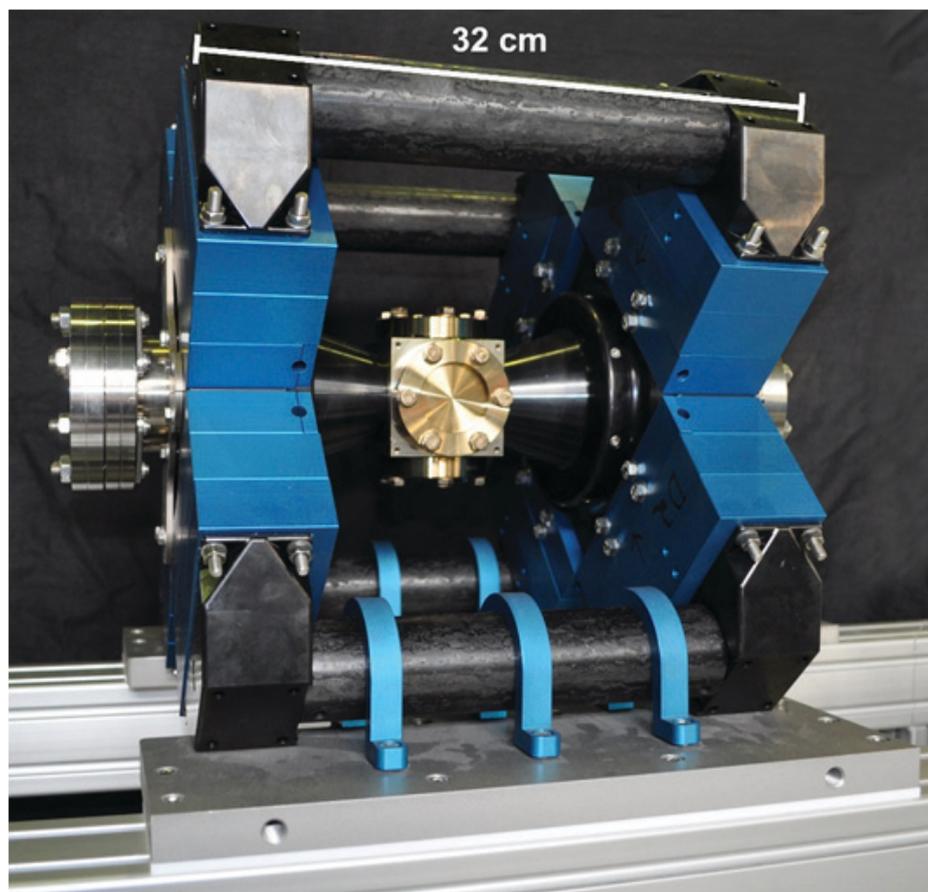
Mit diesen Ergebnissen rückt eine Neudefinition der Sekunde über einen optischen Übergang anstelle des Mikrowellenübergangs im  $^{133}\text{Cs}$ -Atom näher. Daher hat die PTB im Berichtszeitraum auf Anregung der strategischen Planungsgruppe des beratenden Komitees für Zeit und Frequenz (CCTF) eine Roadmap aufgestellt, die den angestrebten Weg zu einer Neudefinition aufzeigt. In dieser Roadmap wurden notwendige Voraussetzungen benannt, die in etwa 10 Jahren zu einer Neudefinition führen können.

In der PTB wird neben der optischen Strontium-Gitteruhr und der Ytterbium-Einzelionenuhr die Möglichkeit einer auf dem Isotop  $^{229}\text{Th}$  basierenden optischen Kernuhr untersucht. Bisher ist es allerdings noch nicht gelungen, den entsprechenden Übergang optisch anzuregen, obwohl die Erzeugung des langlebigen angeregten Zustandes zweifelsfrei nachgewiesen werden konnte. Daher wurde das Projekt nuClock bei der Europäischen Kommission eingeworben, um durch laserspektroskopische Untersuchungen an Thorium-Rückstoßkernen zusätzliche Kenntnisse über die Struktur des Grund- und angeregten Zustands zu erhalten (s. Bild 6).

Im *QUEST-Institut an der PTB* wird in Zusammenarbeit mit dem Max-Planck-Institut für Kernphysik in Heidelberg ein alternativer Ansatz verfolgt, nämlich hochgeladene Ionen, z. B. 13-fach ionisierte Argon-Atome oder 17-fach ionisierte Iridium-Atome, für zukünftige Atomuhren und Grundlagenexperimente zu untersuchen. Die hochgeladenen Ionen werden in einer Elektronenstrahl-Ionenfalle erzeugt und danach in einer Ionenwolke gekühlt, um sie danach zu spektroskopieren (s. Jahresbericht 2015). Bild 7 zeigt die neu entwickelte Ionenquelle.

Ein weiterer Schwerpunkt im *QUEST-Institut an der PTB* ist die Entwicklung einer optischen Uhr basierend auf Ensembles von gefangenen Ionen, um das Signal-zu-Rausch-Verhältnis und somit die Kurzzeitstabilität gegenüber optischen Einzelionenuhren zu verbessern. Dafür war ein neuartiges Konzept für die Ionenfalle zu entwickeln, ein Prototyp aufzubauen und zu charakterisieren, der trotz der Modifizierung für viele Ionen kleinste Unsicherheiten für die realisierte Uhrenfrequenz erreicht. Es konnte jetzt gezeigt werden, dass die relevanten Beiträge der Ionenfalle zur relativen Frequenzunsicherheit einer optischen Ionenuhr auf unter  $10^{-19}$  gesenkt werden können. Die Falle soll zukünftig für den Betrieb einer Uhr mit  $^{115}\text{In}^+ / ^{172}\text{Yb}^+$ -Coulomb-Kristallen (s. Jahresbericht 2015) genutzt werden.

Bild 7: Elektronenstrahl-Ionenfalle, die in Zusammenarbeit mit dem *Wissenschaftlichen Gerätebau* der PTB und dem Max-Planck-Institut für Kernphysik in Heidelberg für ein neues Experiment mit hochgeladenen Ionen entwickelt und aufgebaut wurde



Ionenfallen können auch vorteilhaft bei der Quanteninformationsverarbeitung eingesetzt werden, wobei dann für eine gewünschte Verbreitung dem skalierbaren Herstellungsprozess für geeignete Fallenstrukturen besondere Bedeutung zukommt. Ein solcher Herstellungsprozess wurde in der Arbeitsgruppe von C. Ospelkaus am *QUEST-Institut an der PTB* für mehrlagige Ionenfallen entwickelt, bei denen die Ionen in elektrischen Oberflächenfeldern

gespeichert werden. Elektrodenstrukturen und Zuführungen der elektrischen Signale befinden sich in mehrlagigen Strukturen aus galvanisch aufgetragenen Goldleitern mit einem organischen Dielektrikum (s. Bild 8).

Im Berichtszeitraum haben Wissenschaftler der Abteilung *Optik* renommierte Preise erhalten: Harald Schnatz, Leiter des Fachbereichs *Quantenoptik und*

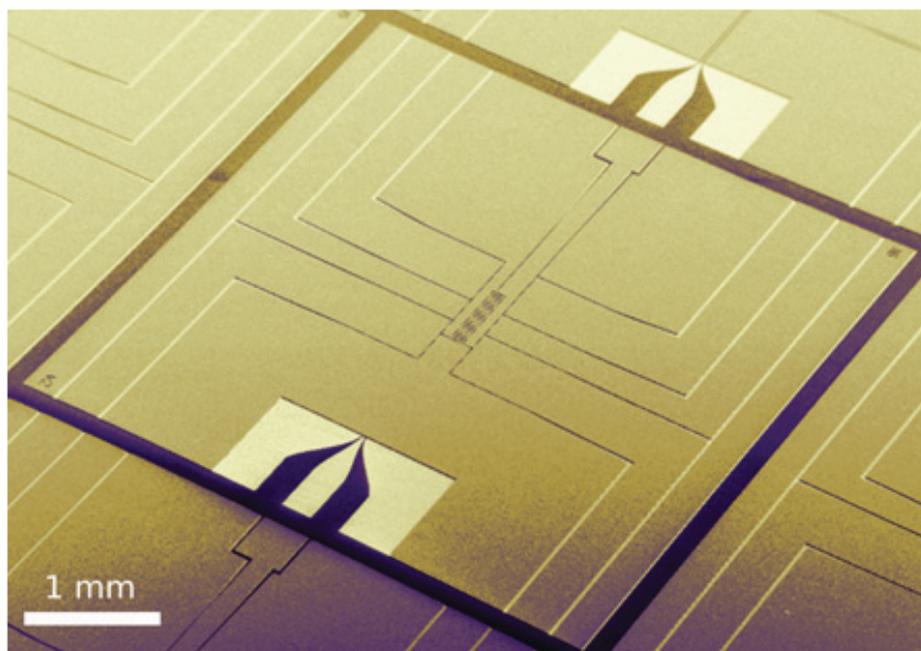


Bild 8: Mehrlagen-Oberflächenfalle für einzelne Ionen, die im Reinraumzentrum der PTB hergestellt wurde



Bild 9: Die Preisträger Harald Schnatz und Nils Huntemann nach der Überreichung der Preise im Railway Museum in York

der Basis des Oktupol-Übergangs in einem einzelnen  $^{171}\text{Yb}^+$ -Ion mit einer Unsicherheit auf dem  $10^{-18}$  Niveau“ mit dem EFTF Young Scientist Award ausgezeichnet (s. Bild 9). Auch dieser Preis ging zuvor schon mehrfach (2012, 2010, 2003) an Forscher aus der PTB. Die Stiftung Werner-von-Siemens-Ring hat Ingo Kröger aus dem Fachbereich *Photometrie und angewandte Radiometrie* als Jungwissenschaftler „in Anerkennung seiner herausragenden wissenschaftlichen Leistungen zur Entwicklung eines neuartigen Lasermessplatzes zur höchstgenauen Untersuchung und Kalibrierung von Solarzellen“ ausgezeichnet (s. Bild 10).

Am 29.11.2016 wurde der langjährige Leiter der Abteilung *Optik*, Fritz Riehle, in den Ruhestand verabschiedet. Seit dem 1.12.2016 leitet Stefan Kück, Leiter des Fachbereichs *Photometrie und Angewandte Radiometrie*, kommissarisch die Abteilung *Optik*.

*Längeneinheit* erhielt in York den European Frequency and Time Forum (EFTF) Award „für seine bahnbrechenden Beiträge zu verschiedenen, aber zusammenhängenden Feldern der höchst genauen Zeit- und Frequenzmessungen und -verteilung, insbesondere die erste phasenkohärente Messung eines Frequenznormals im Sichtbaren und die Verteilung stabiler und genauer Frequenzen über optische Fasernetze“. Nach 2007 und 1997 ist es nun schon das dritte Mal, dass dieser Preis in die PTB geht. Auf der gleichen Veranstaltung wurde Nils Huntemann aus dem Fachbereich *Zeit und Frequenz* „Für die Entwicklung und Evaluierung einer optischen Uhr auf



Bild10: Ingo Kröger erhält die Urkunde als Jungwissenschaftler der Stiftung Werner-von-Siemens-Ring aus der Hand des Vorsitzenden des Stiftungsrates Joachim Ullrich

## In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

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

### Grundlagen der Metrologie

#### Charakterisierung eines berechenbaren quanteneffizienten Detektors für die Anwendung in Photometrie und Radiometrie

Im Rahmen des im Metrologischen Forschungsprogramm EMRP geförderten Projekts NEWSTAR wurde experimentell die Berechenbarkeit eines berechenbaren quanteneffizienten Detektors bezüglich seines polarisations-, winkel- und bandbreitenabhängigen Verhaltens überprüft und bestätigt. Die Empfindlichkeit eines Photometers wurde schließlich gegen diesen Detektor kalibriert und das Ergebnis mit dem Wert verglichen, der sich aus der Kalibrierung entsprechend der aktuellen Rückführungskette ergibt, wobei sich eine Übereinstimmung im Rahmen der Messunsicherheit ergab. (K. Salfner, FB 4.1, [katharina.salfner@ptb.de](mailto:katharina.salfner@ptb.de))

#### Kalibrierung für die Sonnenmessung

Um die spektrale Bestrahlungsstärke der Sonne im nahen Infrarot (NIR) hochgenau vermessen zu können, wurden Spektroradiometer des „Institut royal d'Aéronomie Spatiale de Belgique“ (BIRA-IASB) direkt auf das nationale Normal der PTB für spektrale Bestrahlungsstärke, den Schwarzen Strahler, rückgeführt. Anschließend konnten bei der PYRILIOS-Messkampagne am Mauna Loa Observatory (Hawaii, USA) erfolgreich sogenannte „Top Of Atmosphere“-Messungen mit den in der PTB kalibrierten Geräten durchgeführt werden. (P. Sperfeld, FB 4.1, [Peter.Sperfeld@ptb.de](mailto:Peter.Sperfeld@ptb.de)).

#### Absolut rückgeführte Einzelphotonenlichtquelle auf Basis eines Stickstoff-Fehlstellen-Farbzentrums in einem Nanodiamanten

Eine bezüglich Photonenflusses absolut rückgeführte Einzelphotonenlichtquelle wurde im Rahmen des europäischen EMRP-Forschungsprojektes „*Single-photon sources for quantum technologies*“ (SIQUTE) zum ersten Mal realisiert und metrologisch charakterisiert. Die Einzelphotonenquelle basiert auf einem NV-(Nitrogen Vacancy)-Farbzentrum in einem Nanodiamanten, der auf einer quasi-dielektrischen Antennenstruktur angebracht ist. Der Photonenfluss ist abstimmbare von 55 fW bis 75 fW, was einer Photonenrate von 190 000 Photonen bis 260 000 Photonen pro Sekunde entspricht. (M. López, FB 4.1, [marco.lopez@ptb.de](mailto:marco.lopez@ptb.de))

#### Vergleichsmessung zur Detektionseffizienz eines Einzelphotonendetektors bei einer optischen Leistung von weniger als 100 fW

Im Rahmen des EMRP-Forschungsprojektes „*Single-photon sources for quantum technologies*“ (SIQUTE) wurde die Detektionseffizienz eines Si-Einzelphotonen-Avalanche-Detektors als Transfornormal mit zwei unabhängig voneinander rückgeführten Messverfahren gemessen: zum einen mit dem an der PTB entwickelten „Zwei-Abschwächer-Verfahren“, zum anderen mittels einer direkten Kalibrierung durch Vergleich mit einer am tschechischen nationalen Metrologieinstitut CMI entwickelten extrem rauscharmen Si-Photodiode. Es wurde eine Übereinstimmung der beiden Messverfahren innerhalb der Messunsicherheit festgestellt. (M. López, FB 4.1, [marco.lopez@ptb.de](mailto:marco.lopez@ptb.de))

#### EMRP-Projekt SIQUTE erfolgreich abgeschlossen

Das *Joint Research Project SIQUTE (Single-Photon Sources for Quantum Technologies)* im Rahmen des *Open Excellence Calls des European Metrology Research Programme (EMRP)* wurde erfolgreich abgeschlossen. Das Projekt hatte das Ziel, effiziente Einzelphotonenquellen für Anwendungen in der Metrologie zu entwickeln. Das herausragende Ergebnis der PTB war die metrologische Charakterisierung einer absoluten Einzelphotonenquelle. Details können auf den EURAMET-Webseiten ([www.euramet.org](http://www.euramet.org)) gefunden werden, (S. Kück, FB 4.1, [stefan.kueck@ptb.de](mailto:stefan.kueck@ptb.de))

#### Solarzellenarray zur Charakterisierung von Sonnensimulatoren

Zur Charakterisierung von Sonnensimulatoren wurde ein Detektor entwickelt, der aus einer quadratischen Anordnung von 81 Einzelsolarzellen besteht. Der Detektor wurde unter Bestrahlung mit Sonnenlicht bezüglich seiner Empfindlichkeit für Bestrahlungsstärke und seiner spektralen und Homogenitätseigenschaften charakterisiert. Mit dem Detektor wurde bereits ein gepulster Sonnensimulator charakterisiert. Er steht jetzt auch für die Untersuchung anderer Typen von Sonnensimulatoren zur Verfügung. (F. Plag, FB 4.1, [fabian.plag@ptb.de](mailto:fabian.plag@ptb.de))

### **Neues europäisches Forschungsprojekt zur Formmessung von Asphären und Freiformflächen gestartet**

Im EMPIR-Forschungsvorhaben „Reference algorithms and metrology on aspherical and freeform optical lenses“ werden zusammen mit dem Projektkoordinator „Laboratoire national de métrologie et d'essais“ (LNE) und 17 weiteren Partnern neue Referenzalgorithmen und Messverfahren zur Formmessung von Asphären und Freiformflächen entwickelt. Innerhalb der PTB wird das Forschungsprojekt gemeinsam von den Fachbereichen *Bild- und Wellenoptik* und *Mathematische Modellierung und Datenanalyse* bearbeitet. Schwerpunkte in der PTB sind die Entwicklung von metrologischen Referenzflächen, die die Vergleichbarkeit von Formmessungen verschiedener Messgeräte erleichtern werden, die Auswertung von Vergleichsmessungen zwischen den Projektpartnern sowie die Weiterentwicklung und Unsicherheitsanalyse des Tilted-Wave-Interferometers, das in der PTB für die Formmessung von Asphären und Freiformflächen eingesetzt wird. (M. Schulz, FB 4.2, michael.schulz@ptb.de; C. Elster, FB 8.4, clemens.elster@ptb.de)

### **Scher-Interferometrie mit LED-Multiquellenbeleuchtung zur Formmessung von optischen Oberflächen**

Im Rahmen eines DFG-Projektes ([gepris.dfg.de/gepris/projekt/258565427](http://gepris.dfg.de/gepris/projekt/258565427)) wird in Kooperation mit dem Bremer „Institut für angewandte Strahltechnik“ ein Scher-Interferometer zur Formmessung von optischen Oberflächen entwickelt. Im Mittelpunkt der Entwicklung steht eine teilkohärente LED-Multiquellenbeleuchtung, die eine optimale Anpassung der Beleuchtung an die Prüflingsgeometrie ermöglicht. In Kombination mit einem Raytracing-Modell des Interferometers können auch asphärische Oberflächen gemessen und die Messunsicherheit untersucht werden. (J.-H. Hagemann, FB 4.2, janhendrik.hagemann@ptb.de)

### **Polarisationseffekte bei reflektometrischen Messungen von Effektpigmenten**

Zur präzisen Messung des Strahldichtefaktors ist die reflektierte Strahlung so vollständig wie möglich zu charakterisieren, inklusive ihres Polarisationszustands. Dazu wurde das Gonioreflektometer der Arbeitsgruppe *Reflexion und Transmission* mit einer Polarisations-Analysator-Einheit ausgestattet. Die Notwendigkeit der polarisationssensitiven Untersuchung wurde anhand von Messungen an goniochromatischen Effektpigmenten gezeigt, bei denen sich besonders große Polarisationseffekte beobach-

ten lassen, die stark von der Messgeometrie und der Wellenlänge abhängen. (T. Quast, FB 4.2, tatjana.quast@ptb.de)

### **Zweifarbigen-Spektroskopie von ultrakalten Calcium-Molekülen**

Durch Photoassoziationsspektroskopie an schmalen Linien in einem ultrakalten Calcium-Gas konnten die Bindungsenergien der schwächstgebundenen Vibrationszustände des  $\text{Ca}_2$ -Moleküls bestimmt werden. In einer Kooperation mit Prof. Tiemann, Leibniz Universität Hannover, wurden aus diesen Daten die langreichweitigen Wechselwirkungen und die Streulänge zwischen Calcium-Atomen im Grundzustand sehr genau bestimmt. (U. Sterr, FB 4.3, uwe.sterr@ptb.de)

### **Laser mit Instabilität und Linienbreite bestimmt durch fundamentales thermisches Rauschen eines Silizium-Resonators bei 124 K**

Die Qualität der besten Laser ist durch das Brown'sche thermische Rauschen ihrer Referenzresonatoren begrenzt. In einem Aufbau mit einem besonders rauscharmen einkristallinen Silizium-Resonator bei einer Temperatur von 124 K ist es gelungen, alle sonstigen störenden technischen Einflüsse soweit zu verringern, dass jetzt eine Rekord-Instabilität von  $4 \cdot 10^{-17}$  erreicht werden kann, die nur noch durch das fundamentale thermische Rauschen begrenzt ist. (Th. Legero, FB 4.3, thomas.legero@ptb.de)

### **Transportable optische Atomuhr auf Reisen**

Anfang 2016 wurden zwei mehrwöchige Messkampagnen im Untergrundlabor LSM (Laboratoire Souterrain de Modane) und am italienischen Metrologieinstitut INRIM, Turin, durchgeführt. Die transportable optische Strontiumuhr der PTB wurde über eine 100-km-Glasfaserverbindung bzw. lokal mit der primären Cäsiumuhr des INRIM verglichen. Die sich aus der Höhendifferenz von 1000 Metern ergebende Gravitationsrotverschiebung zwischen beiden Orten konnte durch den Frequenzvergleich gemessen werden. (S. Vogt, FB 4.3, stefan.vogt@ptb.de)

### **Erfolgreiche Erweiterung des Glasfaserlinks PTB-Hannover: Verteilung von ultrastabilen Frequenzen an mehrere Orte gleichzeitig**

Im Rahmen des SFB1128 geo-Q wird derzeit die Kombination von Faser-Brillouin-Verstärkung mit einem von der PTB patentierten Verfahren erprobt, welches über einen einzelnen stabilisierten Faserlink mehreren Abnehmern eine hochstabile Frequenz rückführbar zur Verfügung stellt. Entlang des

Faserlinks wird an mehreren Orten in Hannover – u. a. im IQO der Leibniz Universität – ultrastabiles Laserlicht extrahiert und so modifiziert, dass jeweils eine phasenstabilisierte optische Frequenz mit einer Übertragungs-Instabilität kleiner als  $1 \cdot 10^{-19}$  bereitsteht. (Th. Waterholter, FB 4.3, thomas.waterholter@ptb.de)

### **Transportabler resonatorstabilisierter Laser zur Untersuchung der Frequenzübertragung über Glasfasern**

Ein neues transportables Lasersystem wurde entwickelt, das sich aufgrund seiner Kompaktheit, Wartungsfreundlichkeit und Instabilität von  $10^{-15}$  (1s) ideal als empfängerseitige optische Referenzfrequenz für die Charakterisierung von Frequenzübertragungen über Glasfasern eignet. Der erste Einsatz des Lasersystems fand in der Leibniz Universität Hannover statt und konnte maßgeblich zur Optimierung und Validierung des Faserlinks zwischen der PTB und Hannover beitragen. (J. Froh, FB 4.3, jan.froh@ptb.de)

### **Validierung von Glasfaserlinkdaten für akkurate Vergleiche entfernter optischer Uhren**

Bei Vergleichen entfernter optischer Uhren über stabilisierte Glasfaserlinks soll der Unsicherheitsbeitrag der Frequenzübertragung unterhalb der Unsicherheit der zu vergleichenden Uhren liegen – trotz langer Kampagnendauern und Messunterbrechungen. Mithilfe eines zweistufigen Verfahrens zur Auswahl von validen Messpunkten, bestehend aus einem Test auf Integrität des Glasfaserlinks und einem Kriterium zur Beschränkung des Unsicherheitsbeitrages, wurde diese Anforderung nun erfüllt. Das Vorgehen zeigte mit den Daten des im Juni 2015 durchgeführten ersten internationalen Vergleichs von Sr-Gitteruhren eine Ungenauigkeit von nur zwei Teilen in  $10^{19}$ . Somit können nun zuverlässig Frequenzvergleiche mit dieser kleinen Unsicherheit selbst für ausgedehnte Messkampagnen durchgeführt werden. (S. Koke, FB 4.3, sebastian.koke@ptb.de)

### **Erfolgreicher deutsch-französischer Fontänenuhrenvergleich über Glasfaser**

Vier zu den weltweit besten Primäruhren gehörende Cäsium-Fontänenuhren (je zwei an der PTB und am LNE-SYRTE in Paris) sind erstmals über eine 1400 km lange optische Glasfaserstrecke miteinander verglichen worden. Der Vergleich zeigt, dass die Frequenzen der Fontänenuhren im Rahmen ihrer Unsicherheiten auf wenige  $10^{-16}$  übereinstimmen. (G. Grosche, FB 4.3, gesine.grosche@ptb.de, S. Weyers, FB 4.4, stefan.weyers@ptb.de)

### **Faser-Kollimatoren in wechselndem Immersionsmedium: Vergleich von Simulation und Experiment**

Für die Bestimmung des Gitterparameters von Si-28 im Avogadro-Projekt wird u. a. ein optisches Interferometer im Vakuum betrieben. Die hierfür benötigten Signal- und Referenzstrahlen werden jeweils von einem linsenbasierten Faser-Kollimator geformt, welcher das aus einer Glasfaser kommende Laserlicht bündelt. Die Eigenschaften der kollimierten Strahlen, Wellenfront und Bestrahlungsstärkeverteilung, werden mittels eines kalibrierten Wellenfront-Sensors und eines kalibrierten Strahlprofil-Sensors an Luft bestimmt. Um die Strahleigenschaften im Vakuum zu ermitteln, wurden bereits 2015 Simulationsrechnungen mit einem strahlenbasierten Beugungsintegral durchgeführt (vgl. Jahresbericht 2015). Der experimentelle Nachweis des „Evakuierungseffekts“ auf die Wellenfront stand noch aus. Dies konnte nun mithilfe eines Vakuumfensters nachgeholt werden. Desweiteren ist es gelungen, die Kollimatoren an Luft so einzustellen, dass die entsprechend gekrümmte Wellenfront im Vakuum flach wird. Simulation und Experiment stimmen gut überein. (B. Andreas, FB 4.3, birk.andreas@ptb.de)

### **Europäisches Metrologie-Forschungsprogramm EMPIR fördert zwei neue Projekte im Bereich der optischen Uhren und Glasfaserverbindungen**

Im zweiten Call des europäischen Metrologieforschungsprogramms EMPIR (European Metrology Programme for Innovation and Research) beteiligen sich die Fachbereiche *Quantenoptik und Längeneinheit* und *Zeit und Frequenz* an zwei Projekten. Ziel des von der PTB koordinierten Projektes *OFTEN*, (Optical frequency transfer – a European Network) ist es, die für den Vergleich entfernter Uhren notwendigen glasfaserbasierten Technologien weiter voranzutreiben, um sie für dauerbetriebsfeste und validierte Frequenzvergleiche zwischen den beteiligten Staatsinstituten einzusetzen. Im Rahmen des Projektes *OC18* (Optical clocks with  $10^{-18}$  uncertainty) werden optische Uhren so weiterentwickelt, dass ihre relative Frequenzunsicherheit nur noch  $1 \cdot 10^{-18}$  beträgt. Damit werden Voraussetzungen geschaffen für eine zukünftige Neudefinition der Sekunde und für weitere Anwendungen dieser neuen Uhren in der Forschung. (H. Schnatz, FB 4.3, Harald.Schnatz@ptb.de, E. Peik, FB 4.4, ekkehard.peik@ptb.de)

## **Hochgenaue Bestimmung des Gravitationspotentials bei Atomuhren**

In Zusammenarbeit mit dem Institut für Erdmessung der Leibniz Universität Hannover wurde das Gravitationspotential an den Atomuhren-Standorten der PTB und drei weiterer europäischer Metrologieinstitute (London, Paris, Turin) aus einer Kombination von GPS-Koordinaten, dem Nivellement zu Höhenreferenzpunkten und aktualisierten Geoid-Modellen neu bestimmt. Die aus dem Potential zu berechnende Gravitationsrotverschiebung, deren Kenntnis bei Uhrenvergleichen benötigt wird, kann nun mit einer deutlich reduzierten Unsicherheit von  $2,4 \cdot 10^{-18}$  angegeben werden. (S. Weyers, FB 4.4, stefan.weyers@ptb.de)

## **Pulsdefekt-immune Anregungsmethode für Atomuhren**

Viele Atomuhren verwenden die sogenannte Ramsey-Methode der Anregung mit zwei zeitlich getrennten Pulsen. Dabei können Pulsdefekte, wie sich wiederholende Änderungen der Intensität oder Phase, zu Frequenzfehlern der Uhr führen. Durch die Kombination von Signalen, die mit unterschiedlich weit getrennten Puls paaren erhalten werden, können diese Fehler sehr effizient unterdrückt werden. (C. Sanner, FB 4.4, christian.sanner@ptb.de)

## **Neue Methode zur Vermeidung von unkontrollierten Wechselwirkungen in Fontänenuhren**

In Fontänenuhren können Wechselwirkungen der Atome mit resonanten Mikrowellenfeldern außerhalb der eigentlichen Bestrahlungszone zu Frequenzfehlern führen. Die PTB hat eine Methode entwickelt, diesen Fehler zu reduzieren. Mittels einer digitalen Frequenzsynthese wird die Mikrowellenfrequenz synchron zum Fontänenzyklus verstimmt. Mögliche Wechselwirkungen werden dadurch so stark abgeschwächt, dass Frequenzfehler auf weniger als  $4 \cdot 10^{-17}$  limitiert werden. Dabei wird sichergestellt, dass die Phase des Mikrowellenfeldes vor und nach der Verstimmung auf Mikroradian übereinstimmt. (M. Kazda, FB 4.4, michael.kazda@ptb.de)

## **Laserspektroskopie mit Rückstoßkernen**

Im Rahmen des EU-Projekts nuClock wird in einer interdisziplinären Kooperation die Möglichkeit einer auf dem Isotop Th-229 basierenden optischen Kernuhr untersucht. Um dafür benötigte Information über die Kernstruktur im Grund- und angeregten Zustand zu erhalten, wurde mit Lasersystemen der PTB am Maier-Leibnitz-Laboratorium der LMU München erstmals Laserspektroskopie an Ionen von Th-229 Rückstoßkernen durchgeführt.

Diese Kerne befinden sich, kurz nach ihrer Entstehung aus dem Zerfall von U-233, teilweise noch im angeregten Zustand, der bisher im Labor noch nicht gezielt erzeugt werden konnte. (E. Peik, FB 4.4, ekkehard.peik@ptb.de)

## **Effizienter Quanten-Algorithmus zum Auslesen einer Uhr entwickelt**

Gemeinsam mit der Arbeitsgruppe von Prof. K. Hammerer an der Leibniz Universität Hannover haben Forscher des *QUEST-Instituts* an der PTB einen Algorithmus zum Auslesen einer auf mehreren Aluminium-Ionen basierenden optischen Uhr entwickelt. Dieser erlaubt es, die Anzahl der erforderlichen Auslese-Ionen dramatisch zu reduzieren, indem der Zustand der Uhren-Ionen binär kodiert und ausgelesen wird. Die theoretischen Untersuchungen spielen eine Rolle für zukünftige Ionenuhren mit verbesserter Auflösung. (Piet O. Schmidt, QUEST, piet.schmidt@quantummetrology.de)

## **Diskrepanz Isotopie-Verschiebung in $\text{Ca}^+$**

Forscher des *QUEST-Instituts* konnten die Isotopieverschiebung von zwei Übergängen in einfach geladenem Calcium mit einer Auflösung von 100 kHz über Photonen-Rückstoß-Spektroskopie messen. Zusammen mit Forschern des Instituts *Fundamentale Physik für Metrologie* (FPM) der PTB und weiteren Kollaborationspartnern wurde eine signifikante Abweichung von theoretischen Vorhersagen basierend auf Atomstrukturrechnungen gefunden. Weitere Messungen und eine genaue Analyse der theoretischen Modelle sind erforderlich, um diese Diskrepanz zu klären. (A. Surzhykov, FPM, andrey.surzhykov@ptb.de, Piet O. Schmidt, QUEST, piet.schmidt@quantummetrology.de)

## **Herstellung einer Mehrlagen-Mikroionenfalle für die Quanteninformationsverarbeitung**

Am *QUEST Institut* wurde in der Arbeitsgruppe von Prof. C. Ospelkaus ein skalierbarer Herstellungsprozess für mehrlagige Ionenfallen entwickelt. Die Ionen sollen dabei durch elektrische Felder, ausgehend von Elektroden in der metallischen Oberfläche, gespeichert werden. In den unteren Lagen werden die hierfür notwendigen Signale zugeführt. Die Struktur besteht aus galvanisch aufgebracht Goldleitern mit einem organischen Dielektrikum. (A. Bautista-Salvador, QUEST, amado.bautista@ptb.de)

### **Neue Ionenfalle zur hochpräzisen Spektroskopie an Coulomb-Kristallen fertiggestellt und experimentell charakterisiert**

Am QUEST-Institut wurde eine in Zusammenarbeit mit dem Fachbereich *Wissenschaftlicher Gerätebau* entwickelte skalierbare Ionenfalle für Multi-Ionen-Uhren in Betrieb genommen und charakterisiert. Die Falle besteht aus Aluminiumnitrid-Plättchen, deren Elektrodenstrukturen mit einem gepulsten Laser mikrometergenau geschnitten wurden. An gefangenen  $\text{Yb}^+$ -Ionen durchgeführte Messungen zeigen, dass sie für den Betrieb einer Multi-Ionen-Uhr mit einer relativen Frequenzunsicherheit unterhalb von  $10^{-19}$  geeignet ist. (J. Keller und T.E. Mehlstäubler, QUEST, jonas.keller@ptb.de, tanja.mehlstaebler@ptb.de)

### **Neuer Sonderforschungsbereich „Designte Quantenzustände der Materie (DQ-mat)“ hat seine Arbeit aufgenommen**

Im von der DFG mit knapp 10 Mio. Euro geförderten Sonderforschungsbereich DQ-mat arbeiten Forscher der Leibniz Universität Hannover, der PTB in Braunschweig und des Zentrums für angewandte Raumfahrt und Mikrogravitation in Bremen zusammen, um besondere quantenmechanische Eigenschaften von Vielteilchensystemen für die Metrologie auszunutzen. So soll die Auflösung und Genauigkeit von Atominterferometern und Uhren verbessert und für grundlegende Tests der Physik eingesetzt werden. (P. O. Schmidt, QUEST, piet.schmidt@quantummetrology.de)

### **Metrologie für die Wirtschaft**

#### **Direkte spektrale Empfindlichkeitskalibrierung einer Mehrfachsichtsolarzelle durchgeführt**

In der Arbeitsgruppe *Solarzellen* wurde erstmals mittels laserbasierter differentieller spektraler Empfindlichkeitsmessung der Kurzschlussstrom von Mehrfachsichtsolarzellen für Messbedingungen, die der Strahlung im Weltall entspricht, bestimmt. Der interne Aufbau dieser Zellen, welche aufgrund ihrer hohen Wirkungsgrade zur Stromversorgung im Weltall verwendet werden, verhindert üblicherweise den Einsatz dieser Methodik. Durch die zusätzliche Verwendung von High-Power-LEDs und einer Präzisionsspannungsquelle konnte gezeigt werden, dass die an der PTB etablierte Methode auch zur absoluten Kalibrierung dieser Objekte eingesetzt werden kann. (F. Witt, FB4.1, florian.witt@ptb.de)

### **Untersuchungen zur Bestimmung der absoluten Form aus Tilted-Wave-Interferometer-Messungen**

Die Tilted-Wave-Interferometrie ist eine vielversprechende Methode zur hochgenauen Formmessung von Asphären und Freiformen. Bei der Auswertung der Interferenzstreifen erhält man in der Regel nur relative optische Pfadlängendifferenzen (OPD). Zur absoluten Formmessung muss jedoch mindestens eine OPD absolut bekannt sein. In einer Simulationsstudie wurden die Anforderungen an die notwendige Genauigkeit und Art dieser absoluten OPD-Messung ermittelt. (I. Fortmeier FB 4.2, ines.fortmeier@ptb.de, C. Elster FB 8.4, clemens.elster@ptb.de)

### **Metrologie für die Gesellschaft**

#### **Messung eines spektral höchstauflösten extraterrestrischen UV-Spektrums**

Im Rahmen des EMRP-Projektes „ATMOZ“ wurden während einer Messkampagne am Izaña-Observatorium auf Teneriffa höchstauflösende Messungen der direkten solaren spektralen Bestrahlungsstärke mit einem Fourier-Transform-Spektrometriometer durchgeführt. Über die sogenannte Langley-Extrapolationsmethode konnte das relative extraterrestrische Spektrum im Spektralbereich von 305 nm bis 380 nm mit einer Auflösung von  $< 0,02$  nm bestimmt werden. Dieses Referenzspektrum wird für präzise Messungen zur Bestimmung der Ozonsäule benötigt. (I. Kröger, FB 4.1, ingo.kroeger@ptb.de)

#### **Bestimmung der Ozonschichtdicke**

Im Rahmen einer gemeinsamen Kooperation mit der Firma Gigahertz-Optik GmbH wurde ein kompaktes Array-Spektrometriometer umfangreich charakterisiert und modifiziert. Durch Messung der direkten solaren Bestrahlungsstärke im UV-Spektralbereich konnte mithilfe von Strahlungsmodellen die Dicke der Ozonsäule in der Atmosphäre ermittelt werden. Die Ergebnisse, die während einer Messkampagne am Izaña-Observatorium für Atmosphärenforschung auf Teneriffa im Zuge des EMRP-Projektes „ATMOZ“ erzielt werden konnten, stehen in sehr guter Übereinstimmung mit den üblichen klassischen Messmethoden. Mit dem Array-Spektrometriometer steht nun ein wesentlich vereinfachtes Messgerät für genaue Ozonmessungen zur Verfügung. (P. Sperfeld, FB 4.1, peter.sperfeld@ptb.de).

#### **Rückführbare Messungen von Referenznanopartikeln für die medizinische Diagnostik**

In der medizinischen Diagnostik könnte zukünftig die Analyse von submikrometergroßen Mikrovesikeln eine wichtige Rolle spielen. Im Rahmen eines

europäischen Forschungsprojekts (EMRP HLT02) sind Referenznanopartikel entwickelt und untersucht worden, mit denen klinische Laboratorien die Messgeräte prüfen und validieren können, die zur Untersuchung dieser Mikrovessikel eingesetzt werden. (E. Buhr, FB 4.2, [egbert.buhr@ptb.de](mailto:egbert.buhr@ptb.de), M. Krumrey, FB 7.1, [michael.krumrey@ptb.de](mailto:michael.krumrey@ptb.de))

### **DCF77 besser unter Kontrolle**

Seit Sommer 2016 wird die Cäsiumatomuhr, von der in der Sendefunkstelle Mainflingen das mit DCF77 gesendete Signal abgeleitet wird, durch einen hochgenauen Zeitvergleich mit der in der PTB Braunschweig realisierten Zeitskala verglichen. Hierzu wurde ein zuvor in der PTB kalibrierter Empfänger für GPS- und Galileo-Signale in Mainflingen aufgebaut und die automatische Datenübertragung hierher eingerichtet. Die Messunsicherheit ist  $< 5$  ns und erlaubt die bessere Kontrolle des Ganges der Uhr, als es über die bisherige Überwachung des in der PTB empfangenen DCF77-Signals möglich ist. (A. Bauch, FB 4.4, [andreas.bauch@ptb.de](mailto:andreas.bauch@ptb.de))

## **Internationale Angelegenheiten**

### **Abschluss eines internationalen Ebenheits-Messvergleichs an einer optischen Planfläche**

Im Rahmen von EURAMET wurde von 14 europäischen Metrologieinstituten ein wissenschaftlicher Vergleich von Ebenheitsmessgeräten durchgeführt. Als Prüfling diente eine optische Planfläche, deren Oberflächenform auf einer Kreisfläche mit einem Durchmesser von maximal 150 mm gemessen wurde. Aus den Messergebnissen wurde die mittlere Oberflächenform bestimmt, wobei die unterschiedlichen lateralen Auflösungen der Instrumente und die unterschiedlichen Orientierungen des Prüflings während der Messung berücksichtigt wurden. Es zeigte sich, dass alle Messungen innerhalb der von den Teilnehmern angegebenen Unsicherheitsintervalle mit der mittleren Form übereinstimmen. Dieser Vergleich soll als Basis für einen künftigen Schlüsselvergleich des Internationalen Komitees für Maß und Gewicht dienen. (M. Schulz FB 4.2, [michael.schulz@ptb.de](mailto:michael.schulz@ptb.de), S. Quabis FB 5.2, [susanne.quabis@ptb.de](mailto:susanne.quabis@ptb.de))

### **Genauere Zeit für Europa**

Im Sommer 2016 organisierte die PTB eine Kampagne zur Kalibrierung der Signallaufzeiten in den für internationale Zeitvergleiche verwendeten Empfängern von GPS-Signalen der Institute DLR (IKN, Oberpfaffenhofen), METAS (Schweiz), VSL (Niederlande) und BEV (Österreich). Für insgesamt 11 Empfänger konnte eine Ka-

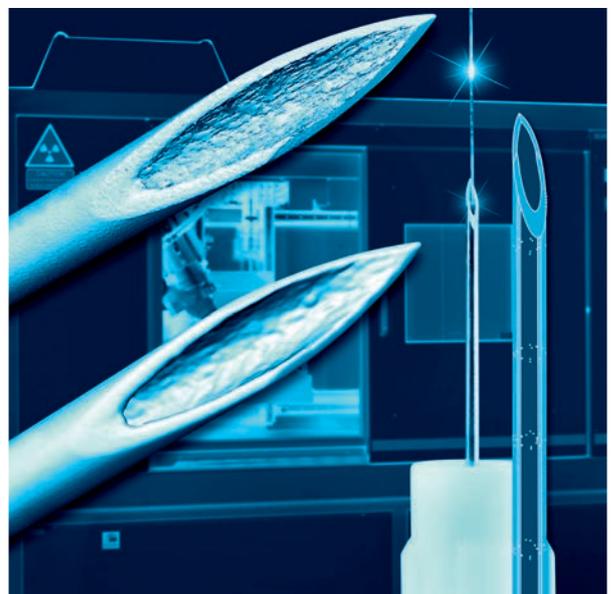
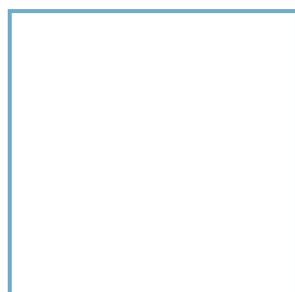
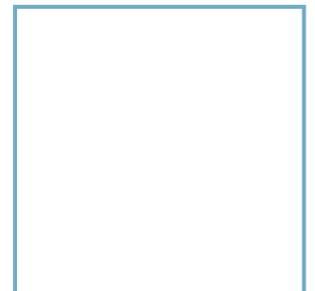
librierunsicherheit von ca. 2,5 ns erreicht werden. (A. Bauch, FB 4.4, [andreas.bauch@ptb.de](mailto:andreas.bauch@ptb.de))

### **Zeitvergleiche über den Atlantik mit Sub-Nanosekunden Unsicherheit**

Die Zeitvergleichsverbindungen zwischen dem United States Naval Observatory (USNO) in Washington D.C. und der PTB wurden in diesem Sommer mithilfe eines transportablen Bodenterminals für Zweiweg-Satelliten-Zeitvergleiche (TWSTFT) des USNO zum wiederholten Mal kalibriert. Die Unsicherheit für Zeitvergleiche zwischen USNO und PTB von weniger als 1 ns wurde dabei bestätigt. (D. Piester, FB 4.4, [dirk.piester@ptb.de](mailto:dirk.piester@ptb.de))

# Abteilung 5

## Fertigungsmesstechnik



In der Abteilung *Fertigungsmesstechnik* werden Forschungs- und Entwicklungsarbeiten mit dem Ziel durchgeführt, den aktuellen sowie insbesondere den künftigen Bedarf von Industrie, Gesellschaft und Wissenschaft an messtechnischer Rückführung dimensioneller Größen mit den jeweils für die Anwendung geforderten Messunsicherheiten bestmöglich zu decken. Basierend auf den Ergebnissen dieser Forschungs- und Entwicklungsarbeiten werden neue und verbesserte messtechnische Dienstleistungen im Bereich der Kalibrierung von Normalen, der Validierung von messtechnischen Verfahren sowie der Prüfung von Algorithmen zur Messdatenauswertung angeboten und durchgeführt. Baumuster- und Entwurfsprüfungen für Längenmess-Maschinen und -Geräte gemäß der Europäischen Messgeräte-Richtlinie (MID) sowie von dimensionellen Messgeräten im Rahmen des Mess- und Eichgesetzes runden das Aufgabenspektrum der Abteilung ab. Darüber hinaus sind Mitarbeiter der Abteilung als Fach- und Systembegutachter für die Deutsche Akkreditierungsstelle (DAkkS) aktiv, wirken bei „peer reviews“ von Metrologieinstituten anderer Länder mit und engagieren sich in nationalen und internationalen Normungsgremien.

Die Bearbeitung der fachlichen Aufgaben der Abteilung erfolgt in den Fachbereichen *Oberflächenmesstechnik*, *Dimensionelle Nanometrologie*, *Koordinatenmesstechnik* sowie *Interferometrie an Maßverkörperungen*. Der Fachbereich *Wissenschaftlicher Gerätebau* der Abteilung unterstützt die gesamte PTB mit qualitativ hochwertigen Dienstleistungen in der Konstruktion, Fertigung und Montage von Prototyp-Messeinrichtungen sowie von Normalen.

Das Schwerpunktthema des diesjährigen Jahresberichts umfasst eine Auswahl aktueller Beiträge der Abteilung im Bereich der Nanometrologie. Die Nanometrologie schafft notwendige messtechnischen Grundlagen für eine sichere und zuverlässige Entwicklung der Nanotechnologie, die von der Bundesregierung im Aktionsplan Nanotechnologie 2020

Titelbild:

Untersuchungen an einer Injektionsnadel im Rahmen des EMRP-Verbundforschungsprojekts „Microparts“: Im Vordergrund links sieht man die Topografie derselben Injektionsnadel mit einem Innendurchmesser von ca. 150 µm, gemessen mittels industrieller Computertomografie (untere, PTB) und mittels Synchrotronstrahlung (obere, BAM). Nach rechts hin folgt die Darstellung einer Messung mit dem Fasertaster (Werth). Ganz rechts eine CAD-Zeichnung der Nadelspitze mit den taktilen Antastpunkten. Im Hintergrund ist die CT-Messeinrichtung der PTB gezeit.

als eine Schlüsseltechnologie und wichtiger Wachstumstreiber der Zukunft identifiziert wird: „Die Nanotechnologie befasst sich mit der kontrollierten Herstellung und Nutzung von Materialien und Komponenten mit funktionsrelevanten Strukturgrößen unterhalb von 100 Nanometern in mindestens einer Richtungsdimension. Dabei resultieren aus der Nanoskaligkeit neue Funktionalitäten und Eigenschaften, die zur Verbesserung bestehender oder zur Entwicklung neuer Produkte und Anwendungen beitragen können.“

Die besonderen Herausforderungen in der Nanometrologie resultieren zum einen aus den geringen Abmessungen der interessierenden Nanostrukturen und Nanoobjekte im Vergleich zu der typischen Größe der zur ihrer Charakterisierung verwendeten Messsonden. Die rückgeführte Messung von Relativbewegungen zwischen Sonde und Messobjekt mit Unsicherheiten im Subnanometer-Bereich erfolgt in der Regel mit hochgenauen Interferometern auf Basis von optischen Wellenlängen im Submikrometer-Bereich. Zum anderen besteht aber die Möglichkeit, auch kristalline Strukturen mit Periodizitäten im Sub-nm-Bereich in der Nanometrologie einsetzen zu können. Dies ist ein Thema, welches auch in der Arbeitsgruppe „Nanometrologie“ im beratenden Komitee für die Länge (CCL) der Meterkonvention auf internationaler Ebene verfolgt wird. Im Folgenden werden einige Beispiele für Ergebnisse aktueller Entwicklungsarbeiten der Abteilung in der Nanometrologie dargestellt und diskutiert.

### **Definierte Nanorauheiten auf ebenen und gekrümmten Oberflächen**

Der Fortschritt in der Oberflächenmesstechnik im Mikro- und Nanometerbereich erfordert immer kleinere Messunsicherheiten und ein besseres Verständnis des Messvorgangs, sei es taktil oder optisch. Neben ebenen Flächen sind auch immer häufiger gekrümmte Oberflächen zu messen bzw. anzutasten. Folglich stellt sich die Frage, welche Steigung wir mit unserem Messverfahren noch erfassen können bzw. welche außerhalb des Messbereiches liegen? Oder noch allgemeiner: Welche Strukturen werden vom Messgerät noch einwandfrei wiedergegeben, wie sieht die Transferfunktion aus? Im Verbundforschungsprojekt „MICROPARTS“ des europäischen Metrologie-Forschungsprogramms (EMRP) wurden zur Klärung dieser Fragen geeignete Referenzproben entwickelt und erprobt.

Die Rauheit stellt eine wichtige Einflussgröße auf die Messung bzw. Antastung von Oberflächen dar,

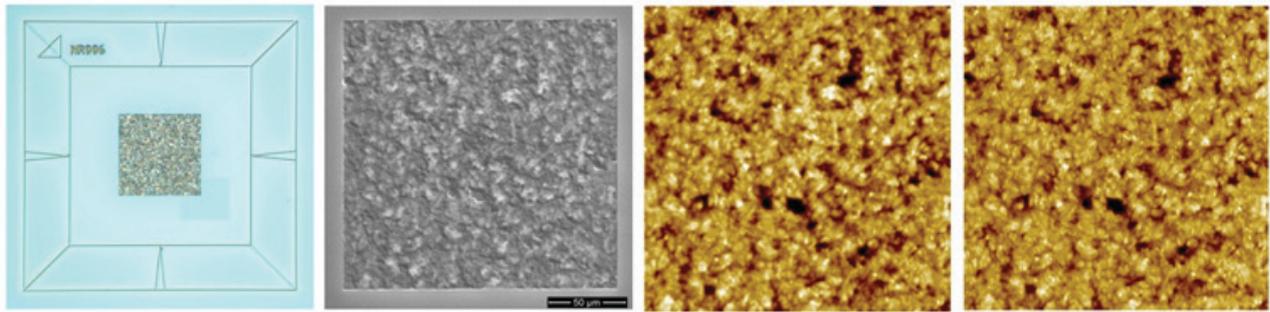


Bild 1 zeigt von links nach rechts eine optische Aufnahme eines mittels FIB hergestellten  $180\ \mu\text{m} \times 180\ \mu\text{m}$  großen Feldes inkl. Findestrukturen, eine rasterelektronenmikroskopische Aufnahme, die AFM-Aufnahme ( $180\ \mu\text{m} \times 180\ \mu\text{m}$ ) der hergestellten Topografie und die Ausgangsoberfläche (ebenfalls AFM). Die AFM-Bilder sind jeweils auf eine Höhen-skala von  $1\ \mu\text{m}$  farbkodiert und belegen eine gute Übereinstimmung von Ausgangs- und FIB-erzeugter Oberfläche.

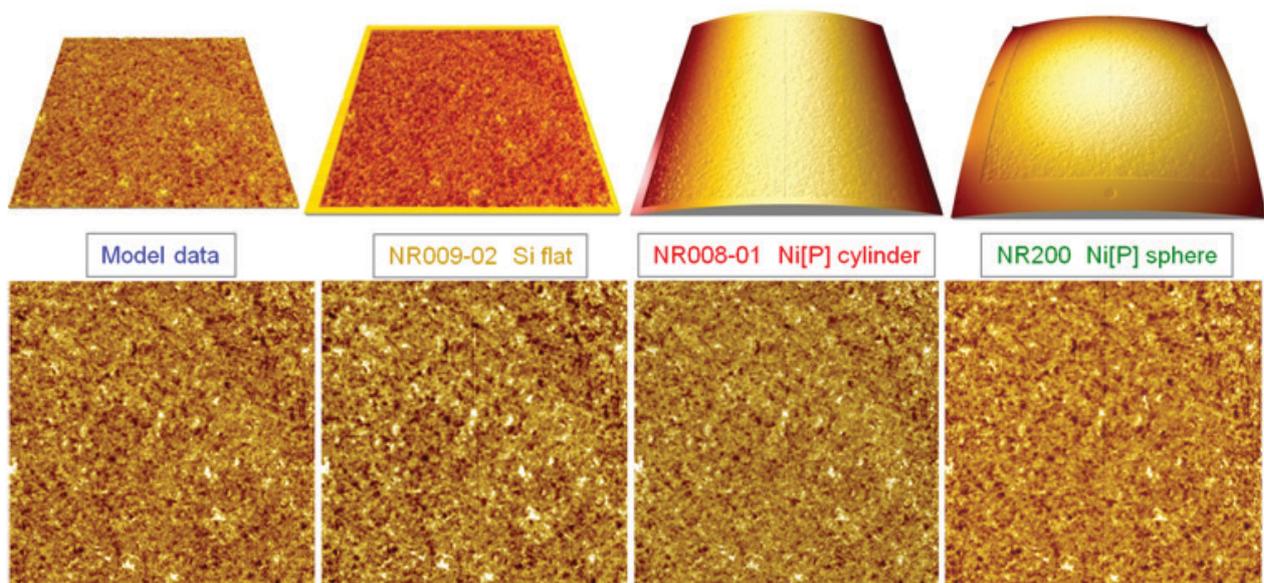
insbesondere bei optischen Messungen. Eine geneigte spiegelnde Fläche liefert bei zu großer Steigung keinen Rückreflex mehr, der von der Apertur des genutzten Objektivs erfasst werden kann. Weist die Fläche aber eine gewisse Rauheit auf, so können noch Anteile des Lichts in das Objektiv gestreut und damit detektiert werden. Um dies im Projekt näher untersuchen zu können, galt es, auf die polierten Oberflächen von verschieden geformten Testkörpern (Ebenen, Zylindern, Kugeln) möglichst dieselben definiert rauen Topografien aufzubringen.

Als hierfür geeignetes Verfahren stellte sich die Strukturierungsmethode mittels eines fokussierten Ionenstrahls (engl. Focussed Ion Beam, FIB) heraus, mit dem man sowohl Material einer Oberfläche sehr gezielt lokal definiert abtragen als auch durch Verwendung von Gasen definiert Strukturen aufbauen

kann – also ein „additiver Fertigungsprozess“ mit Ionen oder Molekülen auf sehr feiner Skala.

Eine real vorliegende und mittels Rasterkraftmikroskopie (engl. Atomic Force Microscopy, AFM) und konfokaler Laserscanning-Mikroskopie (CLSM) gut messbare und damit für die Untersuchungen geeignete Probenrauheit wurde mittels FIB auf die genannten Testkörper-Oberflächen übertragen. Die FIB-Arbeiten im Projekt wurden in Kooperation mit der PTB durch die Firma m2c Calibration in Potsdam durchgeführt. Die so definierten nanostrukturierten Felder wurden anschließend mit CSLM und AFM gemessen, um die hergestellte Oberflächen-textur auf den Testkörpern mit dem Ausgangsdaten-satz vergleichen zu können, Bild1.

Bild 2 zeigt von links nach rechts die Ausgangstopografie ( $290\ \mu\text{m} \times 290\ \mu\text{m}$ ) und die auf eine ebene Si-Oberfläche, auf eine Ni(P)-beschichtete Zylinderoberfläche (Krümmungsradius  $400\ \mu\text{m}$ ), auf eine Ni(P)-beschichtete Kugeloberfläche (Radius  $600\ \mu\text{m}$ ) mittels FIB-Technologie aufgebrachten Topografien. In der unteren Reihe wurden jeweils die Form und langwellige Anteile abgezogen. Alle Flächen zeigen eine sehr gute Übereinstimmung. Diese größeren FIB-Felder mussten aus  $2 \times 2$  FIB-Schreibfeldern zusammengesetzt werden, wodurch sich eine „Naht“ ergibt.



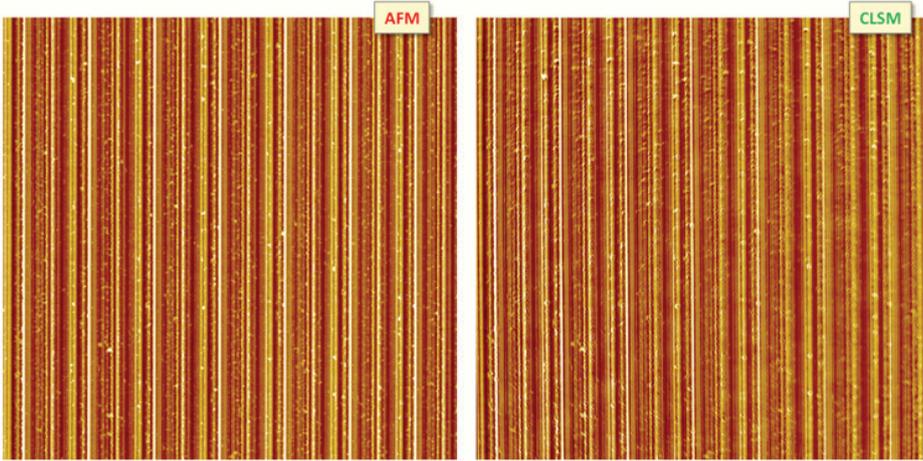


Bild 3: Aufnahmen (links AFM, rechts CLSM) eines 89 µm x 87 µm großen Ausschnitts aus dem hergestellten Schreibfeld. Mittels FIB können neben reinen Profildaten auch flächenhafte Rauheitsstrukturen mit Profiwiederholung hergestellt werden. Hierzu sind weitere Untersuchungen notwendig.

In der Folge wurden diese und andere Texturen auch auf gekrümmte Oberflächen aufgebracht und untersucht. Die gekrümmten Oberflächen wurden im *Wissenschaftlichen Gerätebau* der PTB ultrapräzise poliert, sodass die Rauheit der glatten Fläche jeweils um den Faktor 10 kleiner war als die anschließend mittels FIB zu erzeugende Zielrauheit. Ausgewählt wurde ein Topografiemuster mit einer Rauheit von  $S_q = 123 \text{ nm}$  und einem  $S_z = 1420 \text{ nm}$ . In Bild 2 sind die Ausgangs- und die erreichten Topografien dargestellt. Die gezeigten Aufnahmen erfolgten mit einem CLSM.

Basierend auf den Ergebnissen im Projekt MICRO-PARTS wurden mittels FIB auch Strukturen für Raunormale geschrieben. Bisher gibt es hier geschliffene Normale mit Rauheiten von  $R_z \sim 1 \text{ µm}$  und größer sowie superfeine Raunormale mit Werten im Bereich  $R_z \sim 150 \text{ nm}$  bis  $450 \text{ nm}$ . Dabei zeichnen sich alle Normale durch eine Profiwiederholung aus, was einen Vorteil dargestellt, da das Messergebnis weniger stark vom Startpunkt der Messung abhängt, wenn die Messstrecke ein Vielfaches der Profiwiederholung beträgt. Bei kleineren Rauheiten, z. B. durch Nanoschleifen hergestellt, konnte diese Profiwiederholung nicht mit der erforderlichen Qualität erreicht werden. Dies gelang nun mittels FIB: Für einen Test wurde eine 2D-Profilstruktur mit bis zu sieben Profiwiederholungen generiert. Die Rauheit wurde so skaliert, dass der Ausgangsdatensatz eine Flächenrauheit von  $S_q = 12,5 \text{ nm}$  ergab. Dieses Profil wurde nach Aufbereitung der Daten für die FIB in die Oberfläche eines Silizium-Chips geschrieben. In Bild 3 sind die mit einem AFM und einem CLSM gemessenen Schreibfelder dargestellt. Sehr gut lassen sich die Profiwiederholungen erkennen. Allerdings zeigen beide Bilder auch punktuelle Störungen (FIB-Artefakte), die es in zukünftigen Optimierungsschritten zu vermeiden gilt. Die berechneten Werte (ungefiltert) liegen mit  $S_q(\text{AFM}) = 21,0 \text{ nm}$  und  $S_q(\text{CLSM}) = 19 \text{ nm}$  sehr dicht beieinander. Die Abweichung zum Ausgangsprofil mit  $S_q = 12,5 \text{ nm}$  könnte sicherlich durch eine

verbesserte FIB-Kalibrierung in einem Folgeprozess vermieden werden.

### Herstellung und Anwendung atomar glatter und gestufter kristalliner Oberflächen

Wichtig für die Messung von derart kleinen Rauheiten sind aber auch Normale, die eine Kalibrierung der Höhenskala mit entsprechend geringen Messunsicherheiten ermöglichen. Bislang sind derartige Höhenstufen mittels lithografischer Verfahren als  $\text{SiO}_2$ -Strukturen auf Silizium hergestellt worden. Für optische Messverfahren wurden diese dann mit einer optisch nicht transparenten Metallschicht bedampft. Mit diesem Verfahren können qualitativ sehr gute Stufenhöhennormale von  $2\,000 \text{ nm}$  bis hinunter zu  $6 \text{ nm}$  hergestellt werden. Zur Kalibrierung der kleinen Stufenhöhen werden metrologische AFM eingesetzt, die hier erweiterte Messunsicherheiten von  $0,5 \text{ nm}$  erreichen können.

Im Verbundforschungsprojekt CRYSTAL, das ebenfalls im Rahmen des EMPR durchgeführt wurde, hat man die Selbstorganisation kristalliner Siliziumoberflächen unter Ultrahochvakuumbedingungen (UHV) genutzt, um einerseits Stufenhöhennormale mit kleineren Stufen als bisher als auch breite stufenfreie Bereiche herstellen zu können.

Die Höhe monoatomarer Stufen wird durch das Kristallgitter und deren Gitterabstände verkörpert. Bei monoatomar hohen Stufen wechselt man von einer Ebene von kristallin angeordneten Atomen auf die nächstmögliche Ebene von kristallin angeordneten Atomen. Bei einer Si(111)-Oberfläche beträgt diese Stufenhöhe  $0,313 \text{ nm}$ . Diese ist damit fast 20mal kleiner als die derzeit kleinsten auf  $\text{SiO}_2$ -Si-Basis verfügbaren kommerziellen Stufenhöhennormale. Je nach realisiertem Wachstumsprozess konnten auf diesen strukturierten Siliziumoberflächen „Treppen“ (Bild 4 links), d. h. eine einseitig ansteigende Folge monoatomarer Ebenen, oder die messtechnisch

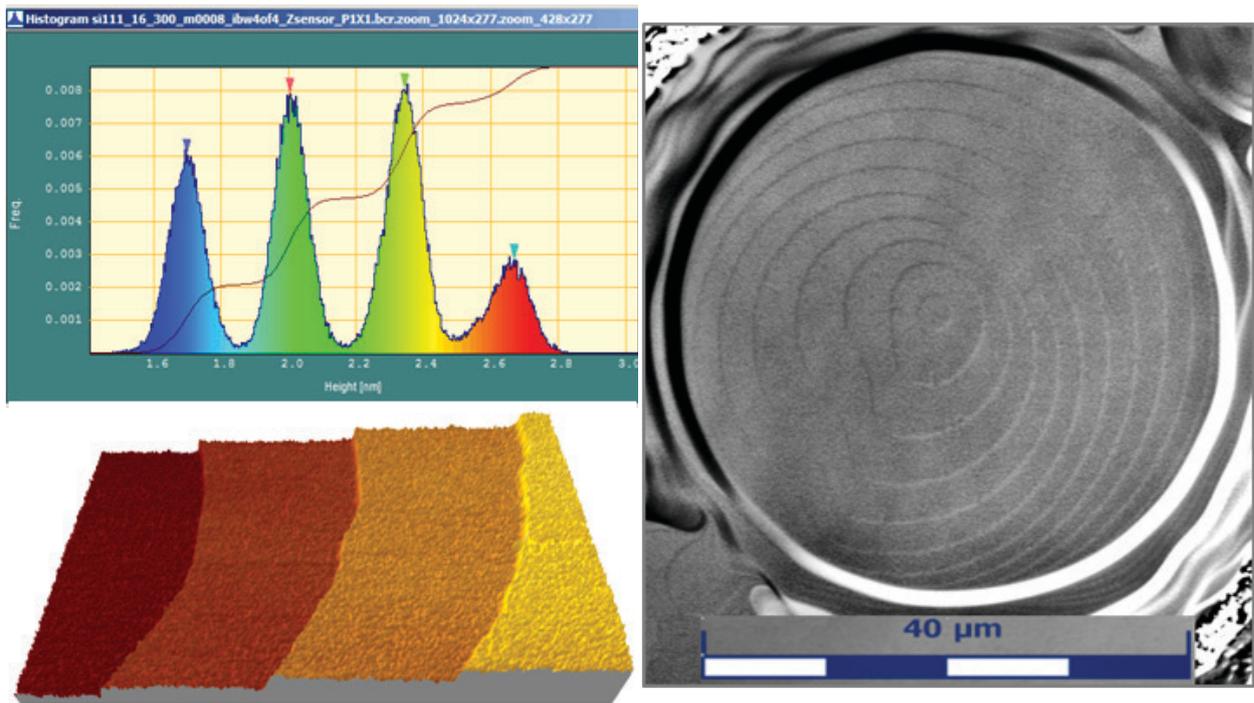


Bild 4: Bereiche auf einer Siliziumoberfläche (links) mit einer mit AFM abgebildeten Treppenstufenstruktur. Das darüber abgebildete Histogramm der Höhenwerte zeigt sehr schön die Abgrenzung der einzelnen Terrassen. Optisch aufgenommene Amphitheater-Struktur (rechts).

günstigeren sogenannte „Amphitheater“-Strukturen (Bild 4 rechts) eingestellt werden. Die Letztere ist für die Kalibrierung von Stufenhöhen besonders günstig, da hierbei eine sehr gute Nivellierung auf gleichhohe Plateaus durchgeführt werden kann. Bei den Treppenstrukturen fehlt dieses „beidseitige Bezugsniveau“. Fehler in den Führungen des Messgerätes wirken sich bei den Amphitheater-Strukturen weniger auf die durchzuführende Nivellierung aus, was ein entscheidender Vorteil ist.

Da jede kristalline monoatomare Stufe gleich hoch ist, kann bei der Kalibrierung der Stufenhöhe auch die gemessene Höhendifferenz von einer unteren Ebene auf eine durch eine bestimmte Anzahl Stufen

höhergelegene Terrasse durch die Anzahl der Stufen dividiert werden. Damit ist eine deutliche Verringerung der Messunsicherheit für die berechnete Höhe einer Einzelstufe möglich. Die Methode ist mit der lateralen Kalibrierung von periodischen Strukturen, z. B. optischen Gittern vergleichbar. Zusätzlich sind die hierbei hergestellten Terrassenflächen, d. h. Ebenen gleicher Höhe, auch so breit, dass sie von optischen Mikroskopen visuell sehr gut aufgelöst werden können. Bei topografischen Messungen mit optischen Mikroskopen zeigt sich dann je nach Güte und Verfahren, ob diese kleinen Stufen gerade noch aufgelöst oder sogar schon gemessen werden können.

Zudem konnten im Projekt CRYSTAL durch Variation der Parameter bei der Behandlung der Siliziumproben große stufenfreie Bereiche mit Ausdehnungen bis zu 100 µm und größer hergestellt werden. Diese Flächen (Bild 5), bei denen die Atome

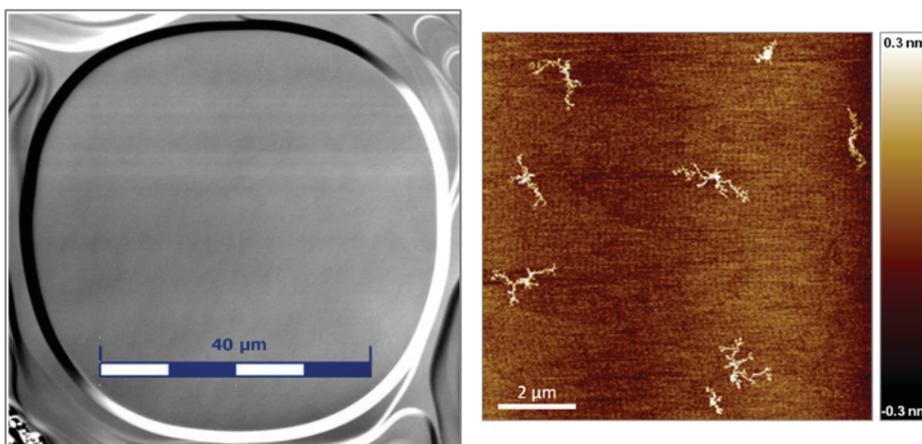


Bild 5: Aufnahmen an einem stufenfreien Bereich: (links) optisch und (rechts) mittels AFM aufgenommener Ausschnitt, der zeigt, dass es Reste von Atomen gibt, die im verwendeten Prozess nicht zu den Rändern diffundieren konnten und sich nun als filigrane Strukturen im AFM zeigen. Die Höhe beträgt 0,3 nm, was einer monoatomaren Stufe entspricht.

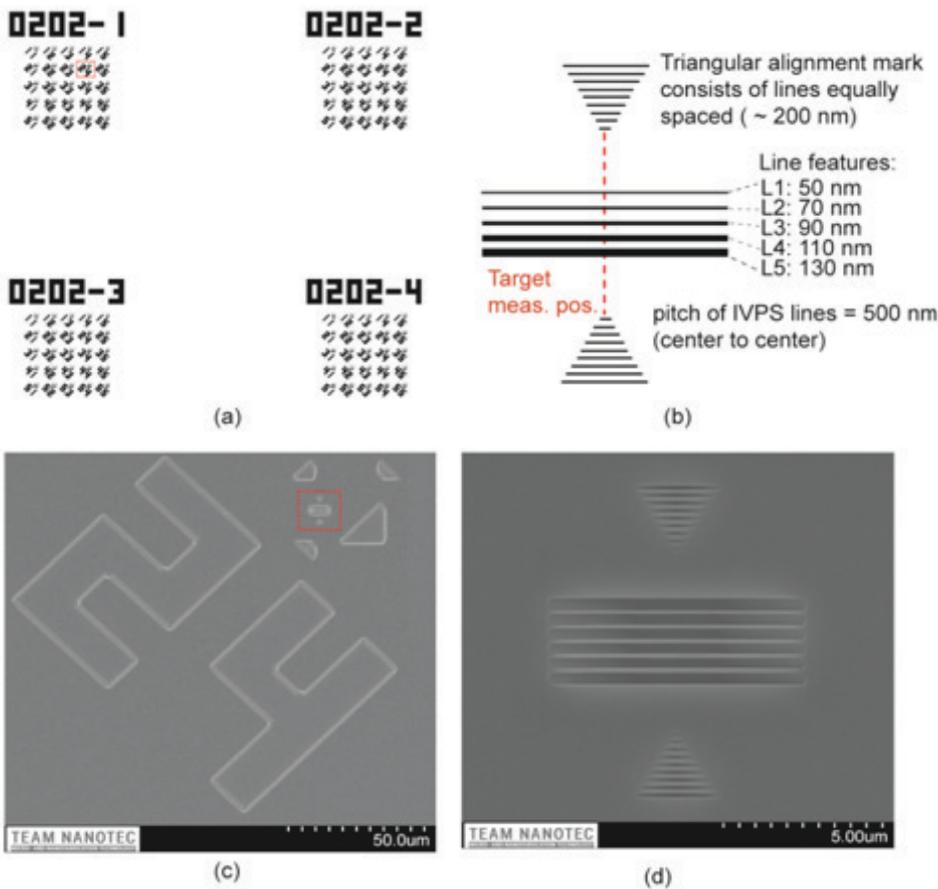


Bild 6: (a) Layout der IVPS-100-PTB-Probe mit 4 Strukturgruppen. Jede Strukturgruppe weist 5 x 5 Linienstrukturen auf; (b) Layout einer Linienstrukturgruppe mit zwei Ausrichtmarkierungen und der Gruppe von 5 Linienstrukturen; (c) REM-Bild einer gefertigten Strukturgruppe und Ident-Nummer; (d) REM-Bild der Ausrichtmarkierungen und der Linienstrukturen im markierten Bereich von (c)

in einer kristallinen Ebene angeordnet sind, eignen sich ausgezeichnet zum Nachweis von Führungsfehlern oder zur Beurteilung der Qualität optischer Referenzflächen. Die sich beim Ausschleusen aus dem UHV bildende Oxidschicht ist sehr stabil und homogen. Veränderungen der Stufenstruktur wurden über den bisherigen Beobachtungszeitraum nicht festgestellt, wenn man von üblichen Kontaminationen durch Luftpartikel absieht.

### Breitenbestimmung einkristalliner Nanostrukturen durch Abzählen von Kristallebenen

Die Bestimmung der Breite von Nanostrukturen und deren Kontrolle spielt in der Halbleiterfertigung eine große Rolle für die Funktion der gefertigten Elemente. Dabei werden an die zur Fertigungskontrolle in der Halbleiterindustrie eingesetzten Messgeräte höchste Anforderungen an die Stabilität und Vergleichbarkeit der Messergebnisse gestellt, die entsprechend hohe Anforderungen an die zur Kalibrierung der Messgeräte eingesetzten Normale nach sich ziehen.

Am Metrologieinstitut der USA (NIST) wurde vor ca. 10 Jahren ein Ansatz verfolgt, monokristalline Linienstrukturen aus Silizium als Strukturbreitenreferenzen zu verwenden. Die Bestimmung der Breite

der Si-Linienstrukturen erfolgte dabei mittels hochauflösender Transmissions-Elektronenmikroskopie (HRTEM) durch „Abzählen“ der Anzahl von Gitterebenen im TEM-Bild und Verwendung des bekannten Gitterebenen-Abstandes für das Si-Volumengitter, bestimmt mittels Röntgen-Verschiebeinterferometrie.

In Kooperation mit der Firma Team Nanotec hat die PTB ein neues Linienbreitennormal auf Basis einkristallinen Si-Materials entwickelt (IVPS-100-PTB), welches sich durch eine sehr gute Qualität der Linienstrukturen bezüglich ihrer Kantenrauheit und Kantenverrundung sowie eine optimierte Markierung der Messbereiche in den Linienstrukturen auszeichnet. Die nominalen Werte der Breite der Linienstrukturen mit senkrechten Seitenwänden sind 50 nm, 70 nm, 90 nm, 110 nm und 130 nm. Bild 6 zeigt das Layout der IVPS-100-PTB-Probe mit mehreren Strukturgruppen, die es erlauben, an dem Normal zunächst mittels Strukturbreiten-Rasterkraftmikroskopie (engl. Critical Dimension AFM, CD-AFM) vergleichende Messungen an interessierenden Strukturgruppen durchzuführen, bevor anschließend eine oder mehrere Strukturgruppen für die Messungen im HRTEM präpariert werden. Die HRTEM-Charakterisierungen wurden in Kooperation mit dem Ernst-Ruska Zentrum in Jülich und dem KIT in Karlsruhe durchgeführt.

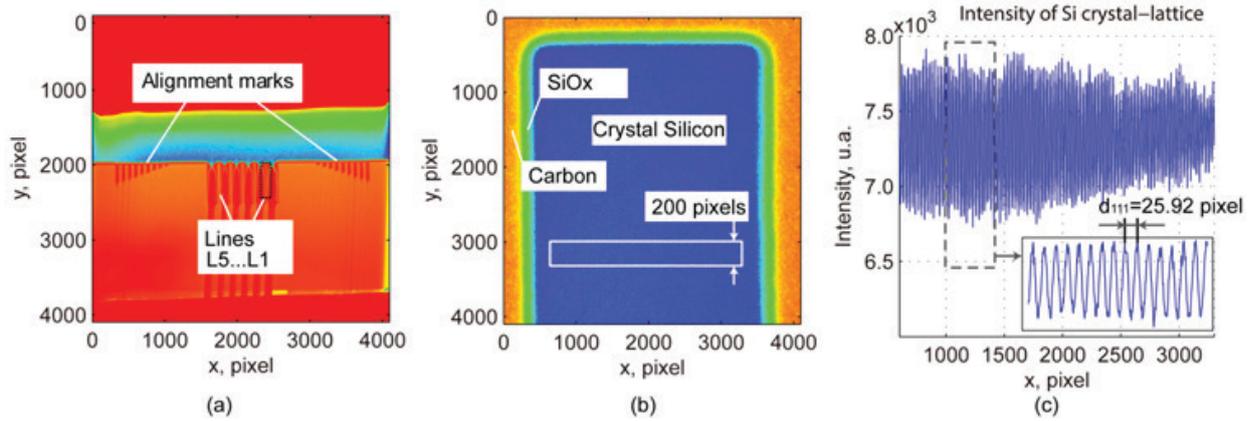


Bild 7: (a) Übersichtsbild von Ausrichtmarkierungen und fünf Linienstrukturen, gemessen mit STEM (Vergrößerung 7,1k); (b) Linienstruktur L1 mit nominaler Breite von 50 nm, gemessen mit STEM (Vergrößerung 1,3 M); (c) gemitteltes Intensitätsprofil des STEM Bildes im markierten Bereich (b) mit Teilbild, welches die Periodizität der STEM-Intensität aufzeigt

Bild 7 zeigt die Ergebnisse der Charakterisierung einer mittels FIB präparierten ca. 50 nm dicken Lamelle mit den Si-Linienstrukturen im STEM-Bild. Die Gruppe der 5 Linienstrukturen L1 bis L5 ist im linken Übersichtsbild gemeinsam mit den Ausrichtstrukturen (alignment marks) zu sehen, eine Si-Einzellinie ist im mittleren Teilbild abgebildet, während das rechte Teilbild das über 200 Pixel gemittelte Intensitätssignal mit der Gitterperiodizität klar zeigt.

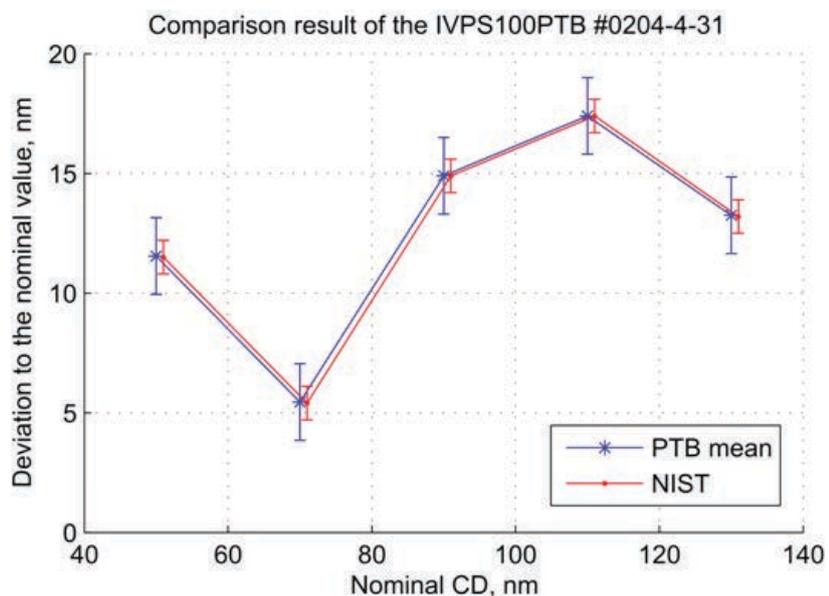
An den Strukturen eines IVPS-100-PTB-Strukturbreiten-Normals wurden im Berichtsjahr vergleichende Messungen mit CD-AFM von NIST und PTB durchgeführt. Es ergab sich hierbei eine gute Übereinstimmung der gemessenen Strukturbreitenwerte mit Differenzen im Sub-Nanometerbereich innerhalb der abgeschätzten erweiterten Messunsicherheiten der beiden Institute (NIST:  $U = 0,7$  nm, PTB:  $U = 1,6$  nm), siehe Bild 8. Dies ist die weltweit erste Vergleichsmessung von zwei Metrologieinstituten an Si-Linienstrukturen mit derart geringen Messunsicherheiten. Der Abschluss der internationalen Vergleichsmessung Nano 6 an vom NIST als Koordinator bereitgestellten Si-Linienstrukturen mit Beteiligung von 11 Metrologieinstituten wird für 2017 erwartet.

### Zusammenarbeiten im Bereich der Nanometrologie

Die oben angeführten Beispiele von Entwicklungsarbeiten mit universitären und industriellen Partnern zeigen die Bedeutung von Forschungsk Kooperationen in der Nanometrologie auf. Nur durch die Kombination spezifischer Kompetenzen der Partner in den Bereichen Präparation, Simulation und Metrologie lassen sich die herausfordernden Ziele gemeinsam erreichen.

In Kooperation mit der Technischen Universität Braunschweig werden zurzeit in der PTB in vier

Bild 8: Von NIST und PTB an einem IVPS-100-PTB-Si-Strukturbreiten-Normal gemessene Abweichungen (deviation) der Strukturbreiten von den nominalen Strukturbreitenwerten (nominal CD)



Fachabteilungen acht Promotionsarbeiten im Rahmen des von der DFG seit Oktober 2014 geförderten Graduiertenkollegs „Metrology for Complex Nanosystems“, kurz „NanoMet“ durchgeführt. Die beiden in der Abteilung *Fertigungsmesstechnik* in diesem Rahmen bearbeiteten Promotionsthemen betreffen zum einen die Entwicklung und Integration eines 6-Achsen-Interferometers in ein UHV-STM für die rückgeführte Positionsmessung des Rastertunnelmikroskops (STM) zur Charakterisierung von Nanostrukturen. Zum anderen wird die Entwicklung von Methoden zur Bestimmung der Form taktiler Antastspitzen auf der Nanoskala mit dem Ziel verfolgt, deren Einfluss auf gemessene Oberflächen mit Nanorauheiten quantitativ erfassen und weitestgehend kompensieren zu können.

An der TU Braunschweig entsteht zurzeit der Forschungsbau „Laboratory for Emerging Nanometrology“, kurz „LENA“, an dem die PTB als strategischer Partner beteiligt ist. Der Abschluss des Bauvorhabens ist für Ende 2017 geplant, bereits zum April 2016 wurde die Nachwuchsgruppe „Metrologie funktionaler Nanosysteme“ eingerichtet, deren Leitung (LENA-Juniorprofessur) gemeinschaftlich von TU Braunschweig und PTB berufen wurde. Die Kooperation mit den beteiligten Instituten der Universität und den Abteilungen der PTB im Rahmen von LENA eröffnet vielversprechende neue Perspektiven zur kooperativen Bearbeitung der Herausforderungen in der Nanometrologie am Standort Braunschweig.

## In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

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

### Grundlagen der Metrologie

#### **Glatt, glatter, atomar glatt – Technologie für die Herstellung neuartiger Stufenhöhennormale**

Die PTB stellt die denkbar glattesten Oberflächen und die denkbar kleinsten Stufen her. Dazu werden Oberflächen präpariert, die auf einer Fläche von  $(100 \times 100) \mu\text{m}^2$  und mehr auf atomarer Skala entweder komplett stufenfrei sind oder periodisch auftretende monoatomare Stufen mit Terrassenbreiten von einigen Mikrometern zeigen. Dies geschieht unter Ausnutzung der Selbstorganisation von Atomen an der Oberfläche von kristallinem Silizium. (O. Lenck, FB 5.1, [oliver.lenck@ptb.de](mailto:oliver.lenck@ptb.de))

#### **Virtuelles Modell für ein metrologisch rückgeführtes UHV-STM fertiggestellt**

Für die Aufrüstung eines UHV-Rastertunnelmikroskops (UHV-STM) mit einem komplexen interferometrischen Messsystem wurde ein virtuelles 3D-Modell des bestehenden Aufbaus erstellt. Für das Upgrade zum metrologischen UHV-STM wurden modernste Methoden der 3D-Erfassung, Virtualisierung und computerbasierten Simulation von komplexen optomechanischen Komponenten angewendet. (R. Popadic, FB 5.1, [radovan.popadic@ptb.de](mailto:radovan.popadic@ptb.de))

### Metrologie für die Wirtschaft

#### **Neues Mikrovolumennormal für die Rasterwalzenmessung**

Ein Mikrovolumennormal für die Überprüfung von optischen Messgeräten zur Rasterwalzenmessung wurde von der PTB im Rahmen einer Industrie-Kooperation entwickelt. Das diamantgedrehte Normal enthält zwei etwa 10 mm breite Bereiche mit periodischen V-förmigen Rillen mit einer Tiefe von  $20 \mu\text{m}$  bzw.  $50 \mu\text{m}$ . Die Normale werden zurzeit unter industriellen Bedingungen getestet und sollen zukünftig zur Überprüfung der eingesetzten Messtechnik für Rasterwalzen verwendet werden. (U. Brand, FB 5.1, [uwe.brand@ptb.de](mailto:uwe.brand@ptb.de))

#### **Aufgeraute Tiefeneinstellnormale bis 900 $\mu\text{m}$ Rillentiefe für optische Messtechnik**

In der Oberflächenmesstechnik werden zunehmend optische Verfahren eingesetzt. Zur Kalibrierung der Höhenmessachse von Geräten, die nur diffus reflektierende Oberflächen messen können, gab es bisher keine geeigneten Tiefeneinstellnormale. In Kooperation mit einem Industriepartner wurde daher ein

Verfahren zum Aufräumen von diamantgedrehten Tiefeneinstellnormalen entwickelt. Das Verfahren beruht auf der Sandstrahltechnik und liefert Oberflächenrauheiten zwischen 50 nm und 150 nm. (U. Brand, FB 5.1, [uwe.brand@ptb.de](mailto:uwe.brand@ptb.de))

#### **Rückführbare Charakterisierung von hochpräzisen Verschiebetischen mit einer Auflösung von 14 pm**

Ein Kalibrieraufbau für die quantitative Charakterisierung der quasi-statischen Eigenschaften von Mikro- und Nanopositioniertischen wurde entwickelt. Wesentlicher Bestandteil des Kalibrieraufbaus ist ein vierstrahliges Planspiegel-Differenzinterferometer (Jamin-Interferometer (NPL)). Durch das spezielle optische und mechanische Design des Kalibrieraufbaus wurde eine Auflösung von 14 pm und ein Grundrauschen kleiner als 10 pm/ (für Frequenzen  $> 1 \text{ Hz}$ ) erzielt. (Zhi Li, FB 5.1, [zhi.li@ptb.de](mailto:zhi.li@ptb.de))

#### **Automatisierung einer Härtenormalmesseinrichtung für das Härteprüfverfahren nach Rockwell**

In der PTB wurde die Messapparatur für das Härteprüfverfahren nach Rockwell erweitert, um ein neues Verfahren für den Messablauf zu implementieren. Das Verfahren ermöglicht eine bedienerunabhängige Umsetzung und beschleunigt den gesamten Messablauf. Bei dem Verfahren wird der voraussichtliche Härtewert einer Härtevergleichsplatte bereits während der Messung abgeschätzt und, ohne weitere erforderliche Eingaben durch den Bediener, eine normkonforme Härteprüfung durchgeführt. (U. Brand, FB 5.1, [uwe.brand@ptb.de](mailto:uwe.brand@ptb.de))

#### **Flexible Fertigung von Mustern für neuartige Raunormale für hochauflösende Oberflächenmesstechniken**

In Kooperation mit einem Industriepartner hat die PTB neuartige Raunormale für hochauflösende Oberflächenmesstechniken entwickelt und erprobt. Hierbei kann die gewünschte Rauheit flexibel vorgegeben und skalierbar übertragen werden. Die Strukturen werden mittels fokussierten Ionenstrahlen (Focussed Ion Beam, FIB) auf ein geeignetes Substrat geschrieben. Dabei können auch die aus der 2D-Rauheitsmesstechnik vorteilhaften Profilwiederholungen realisiert werden. (T. Dziomba, FB 5.1, [thorsten.dziomba@ptb.de](mailto:thorsten.dziomba@ptb.de))

### **Geradheitsmessung mit 2 nm Unsicherheit am Nanometerkomparator**

Am Nanometerkomparator wurden Geradheitsmessungen auf Basis zweier verschiedener Fehlerseparationsverfahren, dem „Traceable Multi Sensor“-Verfahren und dem Umschlagverfahren, durchgeführt und im Nanometerbereich übereinstimmende Ergebnisse erzielt. Ein hochauflösender Geradheitsencoder der Firma Heidenhain konnte dadurch über eine Länge von 320 mm mit einer Unsicherheit von 2 nm kalibriert werden. (C. Weichert, FB 5.2, christoph.weichert@ptb.de)

### **Geometriefehleraufnahme an einer Werkzeugmaschine bei verschiedenen Umgebungstemperaturen**

Ein wesentlicher Anteil an geometrischen Werkstückfehlern wird durch Temperatureinflüsse auf Werkstück und Werkzeugmaschine verursacht. Im Rahmen eines europäischen Projekts wurde eine mobile Klimasimulationskammer konzipiert, um die Umgebungstemperaturen zwischen +15 °C und +45 °C variieren zu können. Der Einfluss unterschiedlicher Umgebungstemperaturen auf die Maschinengeometrie und die Werkstücke konnte damit messtechnisch erfasst und über die Maschinensteuerung kompensiert werden. (K. Wendt, FB 5.3, klaus.wendt@ptb.de)

### **Präzise Größen- und Formbestimmung von Erosionspartikeln mittels Computertomografie**

Erosive Partikel der Größenordnung 100 µm wie Sand oder Flugasche können zu erheblichen Schäden an Turbinen in Kraftwerken und Flugzeugen führen. Diese haben Ausfälle bzw. Leistungseinbußen der Turbinen zur Folge, was enorme finanzielle Folgen für die Wirtschaft nach sich ziehen. Um Turbinen besser vor Erosion zu schützen, müssen neue Materialien entwickelt werden. Dazu bedarf es jedoch genauerer Kenntnis über Temperatur, Geschwindigkeit, Größenverteilung, aber auch Form der Partikel, um genauere Modelle des Erosionsprozesses zu entwickeln. An der PTB wurde nun ein Verfahren entwickelt, mit dem beliebig geformte Partikel mit einem industriellen Computertomografen mit hoher Genauigkeit auf Form und Größe hin untersucht werden können. (Ch. Rothleitner, FB 5.3, christian.rothleitner@ptb.de)

### **Multisensor-Messtechnik für Mikroteile in innovativen industriellen Produkten**

Bauteile mit Geometrien im Submillimeterbereich bis hin zu einigen Millimetern (Mikroteile) spielen für viele Industriesektoren, wie den Fahrzeugbau, die Medizintechnik oder in der Telekommunikati-

on, eine bedeutende Rolle. Oft muss deren Außen- sowie Innengeometrie mit Messunsicherheiten unter 1 µm geprüft werden. Im Projekt MICROPARTS, gefördert im European Metrology Research Programme (EMRP), wurde zusammen mit europäischen Partnern eine signifikante Verbesserung der messtechnischen Möglichkeiten zur Erfassung von Mikroteilen mit Multisensor-Koordinatenmesssystemen erreicht. (O. Kazankova, FB 5.3, olga.kazankova@ptb.de)

### **Prüfung von optisch flächenhaft antastenden 3D-Mikromesssystemen**

Optisch flächenhaft antastende Mikromesssysteme werden zunehmend zur 3D-Messung von Mikrobauteilen eingesetzt. In der PTB wurde die Leistungsfähigkeit derartiger Systeme untersucht. Ziel der Untersuchungen war es, die Anwendbarkeit der neuen Norm DIN EN ISO 10360-8 (2014) zur Prüfung von Koordinatenmessgeräten mit optischen Abstandssensoren auf optisch flächenhaft antastende Mikromesssysteme zu evaluieren. (J. Schlie, FB 5.3, jakob.schlie@ptb.de)

### **Ein neuartiges Großringnormal zur Erprobung von Messverfahren für große Lagerringe**

In der Industrie und in der PTB bestehen jahrzehntelange Erfahrungen in der Kalibrierung von Zylindernormalen, wie etwa Einstellringen, mit Durchmessern bis etwa 300 mm. Im Rahmen des durch das European Metrology Research Programme (EMRP) geförderten Projektes DriveTrain wurde nun ein neuartiges Großringnormal entwickelt, erprobt und kalibriert, das einen Innendurchmesser von 600 mm aufweist. (O. Jusko, FB 5.3, otto.jusko@ptb.de)

### **Groß-Koordinatenmessgerät für Kompetenzzentrum WIND (CCW)**

Im Zuge des Aufbaus eines Kompetenzzentrums für Windenergieanlagen (CCW) erhält die PTB ein Groß-Koordinatenmessgerät mit einem Messvolumen von 5 m × 4 m × 2 m. Hiermit wird erstmals die zuverlässige Rückführung von dimensionellen Messungen großer Getriebebauteile (Zahnräder, Lagerringe, Wellen und Bremsen), wie sie z. B. in Windenergieanlagen zum Einsatz kommen, ermöglicht. (M. Stein, FB 5.3, martin.stein@ptb.de)

### **Das 3D-Lasermeter für die Koordinatenmesstechnik in rauen Umgebungen**

Im Rahmen des europäischen EMRP-Forschungsprojekts „Large Volume Metrology in Industry“ wurde ein intrinsisch refraktionskompensierendes selbstnachführendes Interferometersystem, das 3D-

Lasermeter, entwickelt. Es benötigt außer einem Feuchtesensor keine weiteren äußeren Sensoren, um auch unter rauen Bedingungen, wie sie z. B. in großen Werkhallen im Flugzeugbau typisch sind, Genauigkeiten im Sub-ppm-Bereich zu erreichen. Das 3D-Lasermeter wurde in aufwendigen Messkampagnen erfolgreich verifiziert. (K. Meiners-Hagen, FB 5.4, karl.meiners-hagen@ptb.de)

#### **Verbesserte SI-Rückführbarkeit für ingenieur-geodätische Entfernungsmesssysteme mit geringer Messunsicherheit**

Die Rückführung auf die SI Basiseinheiten basiert in der Geodäsie meist auf Messungen an Pfeilerstrecken. An der PTB wurde im europäischen Metrologieforschungsprojekt „Metrology for long distance surveying“ mit dem TeleYAG-System ein optisches Primärnormal zur Rückführung dieser Basisstrecken mit geringer Unsicherheit entwickelt und verifiziert. Ein „Good Practice Guide“ fasst im Projekt entwickelte Empfehlungen zur Planung, Durchführung, Auswertung und Messunsicherheitsbetrachtung für Kalibrierungen für Anwender zusammen (F. Pollinger, FB 5.4, florian.pollinger@ptb.de)

#### **Fertigung hochgenauer Evolventen-Normale**

Für Messungen an Zahnrädern werden Normale mit Konturen in Form von Evolventen benötigt. Bei der vorliegenden Konstruktions- und Fertigungsaufgabe war ein Normal mit einer Kombination von Innen- und Außenevolvente mit überlagerten kleinen Störungen gefordert. Die Form der geschliffenen zylindrischen Bezugsflächen der Normale mit einem Durchmesser von ca. 300 mm weichen nur wenige Mikrometer von der Idealgeometrie ab. Eine eigens entwickelte Auflagevorrichtung hält die Durchbiegung der Normale gering und ermöglicht eine komfortable Montage in der Messeinrichtung. (R. Meeß, FB 5.5, rudolf.meess@ptb.de)



# Abteilung 6

## Ionisierende Strahlung



Die zentrale Aufgabe der Abteilung ist die Metrologie ionisierender Strahlung in den Bereichen Medizin (Diagnostik und Therapie), Strahlenschutz, Umweltschutz, Wissenschaft und Technologie.

Das Jahr 2016 war geprägt durch verschiedene Umorganisationen und Modernisierungen, um den sich ändernden Anforderungen gerecht zu werden.

So wurde die Metrologie für die Brachytherapie im Bereich der Strahlenschutzdosimetrie neu organisiert, um Kalibrierdienstleistungen für alle in der Praxis vorkommenden Quellen anbieten zu können und um dosimetrische Fragestellungen wissenschaftlich verstärkt zu bearbeiten.

Der Bereich der Neutronenmetrologie wurde neu strukturiert und das Profil des Bereiches – die Bereitstellung und Weiterentwicklung von Feldern, Detektoren und Datenanalyseverfahren für rückführbare Messungen von Neutronenstrahlung und Neutronendosimetrie – geschärft. Der Ersatz des Van-de-Graaff-Beschleunigers durch einen Tandetron kennzeichnet die wichtigste Modernisierung der Ionenbeschleuniger-gestützten Referenzfelder für Protonen,  $\alpha$ -Teilchen, Neutronen und hochenergetische Photonen. Eine Vereinbarung mit den iThemba Labs in Südafrika wurde getroffen, um Forschungsfragen zu bearbeiten und um metrologische Dienstleistungen für Neutronenenergien bis 200 MeV anbieten zu können.

Die Planungen eines neuen Radionuklidlabors im Rahmen des Liegenschaftsplanes der PTB wurde begonnen und parallel Primärmethoden zur Darstellung der Einheit Bequerel vorangetrieben, z. B. im Bereich der  $\alpha$ - und  $\beta$ -Spektroskopie. Zu letzterem wurde das EMPIR-Projekt „MetroBeta“ zusammen mit dem Fachbereich 7.2 (*Kryophysik und Spektrometrie*) gestartet, das die Vermessung von  $\beta$ -Spektren mit magnetischen Mikrokalorimetern in Zusammenarbeit mit dem Kirchhoffinstitut in Heidelberg zum Ziel hat.

### **Quantifizierung der Bildqualität am CT mittels „task specific quality assessment“ – erste Experimente**

Neue Verfahren der Bildrekonstruktion für CT und Mammografie ermöglichen eine Verringerung der Strahlungs dosis für die Patienten bei gleichblei-

Titelbild:

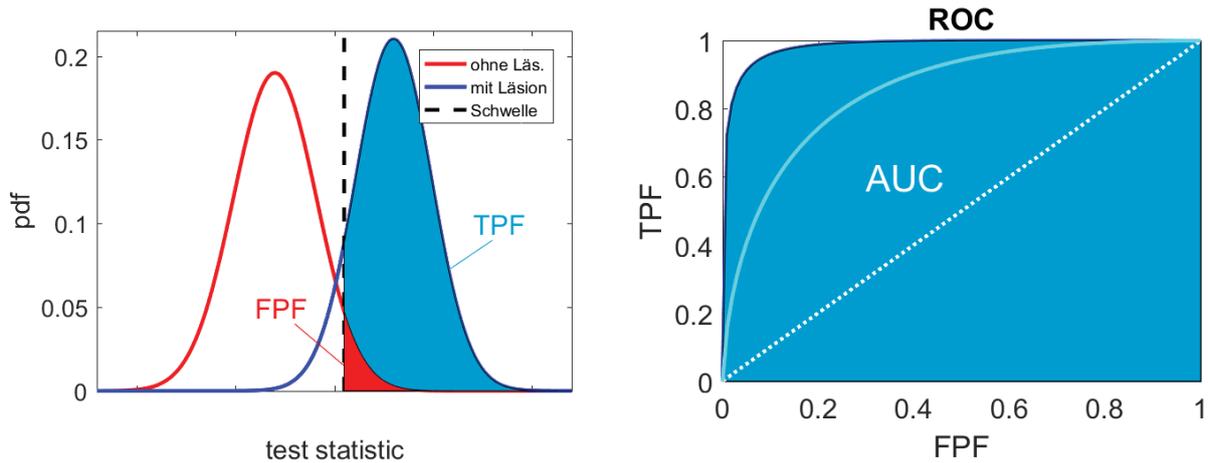
CT-Dosimetriephantom auf dem Patiententisch in der Gantry des medizinischen Computertomografen der PTB

bender Bildqualität – so zumindest die Aussage namhafter Hersteller. Aber wie misst man die Bildqualität objektiv und so, dass auch eine Unsicherheit angegeben werden kann? Etablierte Verfahren, die auf der Annahme linearer, verschiebungsinvarianter Systeme als Modell für die Abbildung basieren, sind für die neuen Rekonstruktionsverfahren nicht mehr anwendbar.

Die Fragestellung wurde im Rahmen einer Konsultation von Experten auf dem Gebiet der medizinischen Bildgebung an die PTB herangetragen und wird seit Anfang dieses Jahres im Fachbereich 6.2 (*Dosimetrie für Strahlentherapie und Röntgendiagnostik*) zusammen mit Fachbereich 8.4 (*Mathematische Modellierung und Datenanalyse*) abteilungsübergreifend bearbeitet. Der in den USA entwickelte und von der FDA (Food and Drug Administration) zur Quantifizierung der Bildqualität verwendete Ansatz wird als „task specific quality assessment“ bezeichnet, also als aufgabenspezifische Qualitätsbewertung.

Eine typische Aufgabe für den Radiologen besteht darin, anhand einer Aufnahme mit einem bildgebenden System zu entscheiden, ob eine Läsion (etwa ein Tumor) vorhanden ist oder nicht. Diese Klassifikationsaufgabe kann mithilfe von simulierten oder experimentellen Daten modelliert werden. Anstelle des Radiologen kommen sogenannte „model observer“ (im Folgenden kurz „Observer“) zum Einsatz: Diese erzeugen aus dem vorliegenden Bild eine Zahl (Test-Statistik), anhand welcher mittels eines Schwellwertes über die Zuordnung zu einer der beiden Klassen (Läsion vorhanden oder nicht vorhanden) entschieden wird. Wie hoch der Anteil fälschlicherweise als „Positiv“ (Läsion vorhanden) bzw. korrekt als „Positiv“ zugeordneter Bilder ist, hängt vom Schwellwert ab. Die Anteile werden als FPF und TPF bezeichnet, für „false positive fraction“ bzw. „true positive fraction“. Eine Auftragung von TPF als Funktion von FPF für alle möglichen Schwellwerte wird als ROC-Kurve bezeichnet, wobei ROC für „receiver operating characteristic“ steht. Die Fläche unter dieser Kurve (AUC) kann zwischen 0,5 und 1 variieren und entspricht der Wahrscheinlichkeit, dass der Observer das Bild korrekt klassifiziert. Diese Zahl kann als Maß für die Bildqualität verwendet werden.

Um diese Verfahren anwenden zu können, werden neben einem Observer große Mengen von Bildern benötigt: Der Observer muss zunächst „trainiert“ werden, bevor Bilder klassifiziert werden können. Wegen der großen Datenmengen werden zunächst



meist simulierte Daten verwendet. Die Erfahrungen mit den simulierten Daten ermöglichen dann, die Einstellungen des bildgebenden Systems zweckmäßig zu wählen.

Anhand von Veröffentlichungen wurde ein Matlab-Programm geschrieben, mit welchem simulierte Bilder erzeugt werden können, die Aufnahmen eines CT oder eines Mammografie-Systems ähneln. Parameter wie Untergrund, anatomisches Rauschen und Quantenrauschen oder Regularisierung können variiert werden. Damit konnten auch Bilder erzeugt werden, die CT-Aufnahmen eines an der PTB entwickelten Prototyps eines Niedrigkontrast-Phantoms stark ähneln.

Das Phantom ist ein Hohlzylinder aus Plexiglas (PMMA), der mit Wasser befüllt werden kann. In dem Hohlzylinder sind vier Rundstäbe aus RW3 angebracht, einem Kunststoff mit Strahlungstransporteigenschaften, die denen des Wassers ähneln. Aus einem CT-Schnittbild dieses Phantoms können vier Bildausschnitte mit einer „Läsion“ im Zentrum sowie vier Bildausschnitte ohne „Läsion“ gewonnen werden. Aus ca. 100 solcher Schnittbilder kann da-

Bild 1. Links: Häufigkeitsverteilungen der von einem Observer erzeugten Test-Statistiken für zwei Klassen von Bildern (mit Läsion: blau; ohne Läsion: rot). Rechts: ROC-Kurven, die dunkelblaue Kurve entspricht den links gezeigten Häufigkeitsverteilungen.

mit ein Test- und ein Trainingsdatensatz für einen Observer gewonnen werden.

Die Parameter für die CT-Aufnahmen wurden mithilfe einiger weniger Testbilder und der oben erwähnten Simulations-Software ermittelt. Für eine Röhrenspannung von 120 kV wurden dann jeweils 100 Schnittbilder bei verschiedenen Werten des Strom-Zeit-Produktes erzeugt. Letzteres bestimmt bei der Anwendung des CT die Patientendosis. Die resultierenden Bilder wurden mithilfe von bekannten Observern, aber auch mit neuen, an der PTB entwickelten Observern untersucht. Die Fläche unter der ROC-Kurve wurde mithilfe eines von der FDA zur Verfügung gestellten Matlab-Software-Paketes ermittelt, ebenso die Unsicherheiten. Erste Ergebnisse, die mit dem an der PTB entwickelten neuen Observer erhalten wurden, sind in Bild 3 dargestellt.

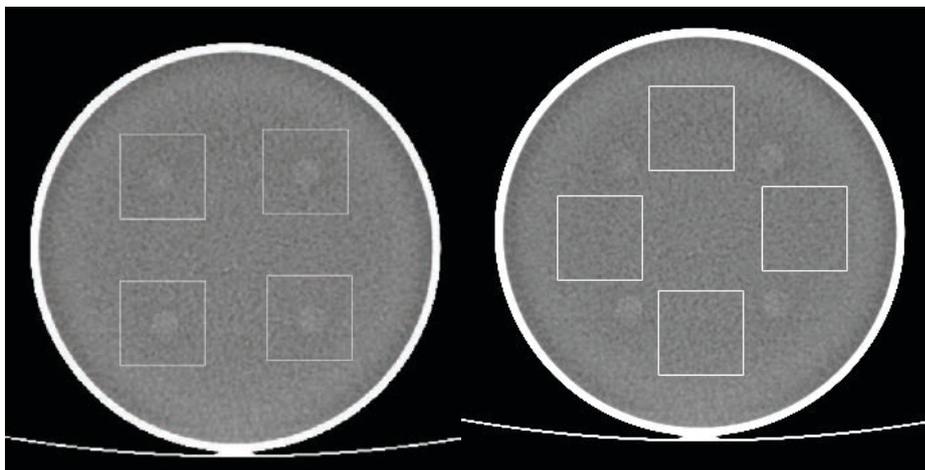


Bild 2. Schnittbilder des Test-Phantoms für 120 kV und 500 mAs, Ausschnitte mit Läsion (links) und ohne Läsion (rechts) sind eingezeichnet.

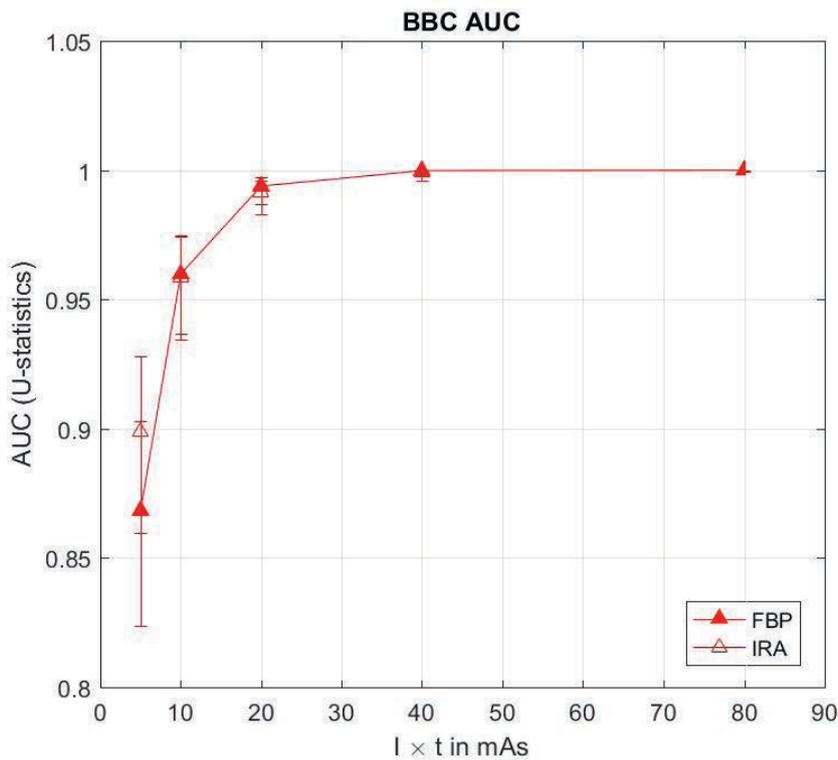


Bild 3. Die Fläche unter der ROC-Kurve (AUC) ist als Funktion des Strom-Zeit-Produktes dargestellt, und zwar für einen der neu entwickelten Observer (BBC). Volle Symbole: Bildrekonstruktion mit der gefilterten Rückprojektion (FBP); offene Symbole: Bildrekonstruktion mit einem iterativen Algorithmus (IRA).

Als nächstes sollen die Unsicherheiten der AUC für die neuen Bayes'schen Observer mithilfe von Markov-Chain Monte-Carlo-Methoden berechnet werden. Anschließend sind weitere Experimente mit einem verbesserten Phantom geplant.

## Entwicklung eines mehrkanaligen Spektrometers zur Charakterisierung von Strahlungsfeldern in der Medizin

Das kommende neue Strahlenschutzgesetz bringt in 2018 eine Senkung des Grenzwertes für die Augenlinsendosis, was die Überwachung mit höherem messtechnischem Aufwand erfordert. Zur Erfüllung dieser neuen Messaufgabe werden spezielle Dosimeter benötigt, welche in Augennähe getragen werden müssen.

Um Anforderungen an diese neuartigen Dosimeter sinnvoll zu formulieren, ist zunächst die genaue Kenntnis der Strahlungsfelder an den unterschiedlichen Arbeitsplätzen notwendig. Für die Charakterisierung dieser Felder wird derzeit ein Messgerät entwickelt, welches kurze Röntgenpulse im Bereich weniger Millisekunden (ms) mit einer sehr kleinen Dosis von wenigen Mikrosievert ( $\mu\text{Sv}$ ) zuverlässig detektieren kann. Gleichzeitig ist es erforderlich, dass bei der Messung sowohl die Energieverteilung des Strahlungsfeldes als auch die Einfallrichtung der Strahlung aufgelöst wird. Um Messungen an medizinischen Arbeitsplätzen unter realistischen Bedingungen durchzuführen, wird angestrebt, dass

das Messgerät eine direkte Anzeige hat und gleichzeitig möglichst kompakt und mobil ist.

Hierfür wurde in Zusammenarbeit mit der Ostfalia Hochschule in Wolfenbüttel im Rahmen von zwei Bachelor-Arbeiten die messtechnische Basis für ein derartiges Spektrometer entwickelt. Dieses Spektrometer basiert auf der Time-over-Threshold-Methode und verfügt über 16 unabhängige und gleichzeitig messende Eingänge (Kanäle). Validierende Messungen mit radioaktiven Spektrometrie-Quellen an diesem Prototypen zeigen vielversprechende Resultate und bestätigen die Funktionsfähigkeit des gewählten Messprinzips.

Auf diesem Funktionsprinzip aufbauend wird in einer laufenden Doktorarbeit (TU Braunschweig) ein vollständiges Spektrometer (Bild 4) entwickelt, das allen obigen Anforderungen gerecht wird. Mit diesem neuartigen Messgerät werden nachfolgend die wichtigsten Strahlungsfelder in der Medizin charakterisiert.

## Stärkung der Bauartprüfung nach Röntgenverordnung: PTB wird durch Strahlenschutzgesetz in 2018 auch Zulassungsbehörde

Das neue Strahlenschutzgesetz (StrlSchG), das 2018 in Kraft treten soll, sieht eine Bündelung der Bauartprüfung und Zulassung nach RöV in der PTB vor. Dafür modernisiert die PTB den Bereich durch eine Überarbeitung der grundlegenden Anforderungen



Bild 4. Verstärkerstufe mit der Möglichkeit, verschiedene Detektorvarianten zu charakterisieren

an die sicherheitsrelevante Hard- und Software von Basisschutzgeräten, Hochschutzgeräten, Vollschutzgeräten und Schulröntgeneinrichtungen, ebenso wie durch eine personelle Neuaufstellung und Maßnahmen zur Verbesserungen der Infrastruktur. Die gestiegene Bedeutung der Bauartprüfung nach RÖV findet auch einen Ausdruck darin, dass die PTB dafür eine eigene Arbeitsgruppe schafft.

Einen Schwerpunkt der Modernisierung bildet dabei die funktionale Sicherheit der zu prüfenden Röntgeneinrichtungen. Funktionale Sicherheit von komplexen Geräten, wie sie auch im Rahmen von Industrie 4.0 diskutiert wird, ist ein wichtiges Zukunftsthema. Sie ist die Basis für gesellschaftliche Akzeptanz, ermöglicht internationalen Technologietransfer und dient somit wirtschaftlichen Basisinteressen.

Um Hersteller und Gutachter bei diesem komplexen Thema zu unterstützen, bietet die PTB den modernisierten Leitfaden „Sicherheitsvorrichtungen von Basisschutzgeräten, Hochschutzgeräten, Vollschutzgeräten und Schulröntgeneinrichtungen“ an. Diese neue Fassung des Leitfadens Dos-49 erläutert grundlegende Prinzipien bei der Konstruktion und Umsetzung einer Sicherheitsarchitektur auf Grundlage der DIN EN 62061.

### MetroERM-Messvergleich für Dosimeter europäischer Frühwarnnetzwerke

Um radiologische Zwischenfälle aufzudecken und eine angemessene Reaktion zu ermöglichen, wurden in allen europäischen Staaten der EU radiologische Frühwarnsysteme installiert. Die metrologische Korrektheit der Messwerte ist eine wesentliche Voraussetzung dafür, dass die installierten Messgeräte ihren Zweck erfüllen. Die PTB hat 15 moderne Dosimetrie-Netzwerksysteme, die insbesondere in EU-Mitgliedsländern installiert werden sollen, in einem Messvergleich untersucht. Im Juni 2016 wurden die

Messungen auf speziellen PTB-Referenz-Messplätzen für niedrige Dosisleistungen durchgeführt: Die Dosimeter wurden unter Referenzbedingungen in der Niedrigdosis-Kalibriereinrichtung im Untertagelaboratorium UDO II, auf einer schwimmenden Plattform (Messplatz für kosmische Strahlung) und auf einem Freifeld-Messplatz bestrahlt.

Teilnehmer aus sieben Ländern, unter ihnen Netzbetreiber aus fünf Staaten, brachten ihre Dosimeter zu Testzwecken zur PTB. In diesem Messvergleich wurden grundlegende metrologische Parameter der Dosimeter wie Empfindlichkeit, Ansprechvermögen bezüglich verschiedener Photonenfelder und das Ansprechvermögen bezüglich der kosmischen Strahlung bestimmt. Die Fähigkeit der Dosimeter, kleine Änderungen der Dosisleistung zu detektieren, wie sie durch eine Kontamination im Bereich einiger  $\text{kBq m}^{-2}$  entstehen, wurde unter Verwendung eines speziellen Gerätes („Wolkenmaschine“) untersucht. Die Ergebnisse dienen dazu, festzustellen, ob die Dosimeter geeignet sind, in europäischen Frühwarnsystemen installiert zu werden. Zudem wird die Kalibrierung der Netzbetreiber auf die PTB rückgeführt. Der Messvergleich wurde unter dem Dach des EMRP-Projektes „MetroERM“ durchgeführt.

### Immobilisierung von DNA-Origamis zwischen Gold-Elektroden

Die Arbeitsgruppe 6.51 (*Phaseneffekte bei der Strahlenwirkung*) untersucht gegenwärtig den Einsatz von DNA als Detektormaterial für ionisierende Strahlung. Hierfür werden die DNA-Moleküle bezüglich ihrer elektrischen Eigenschaften charakterisiert und diese anschließend ionisierender Strahlung ausgesetzt. Die strahleninduzierten Schäden der DNA können über eine Widerstandsänderung registriert werden. Ziel ist es, über diese Widerstandsänderung eine quantitative Aussage zum Maß der Strahlenschäden treffen zu können. Ein großer Vorteil des

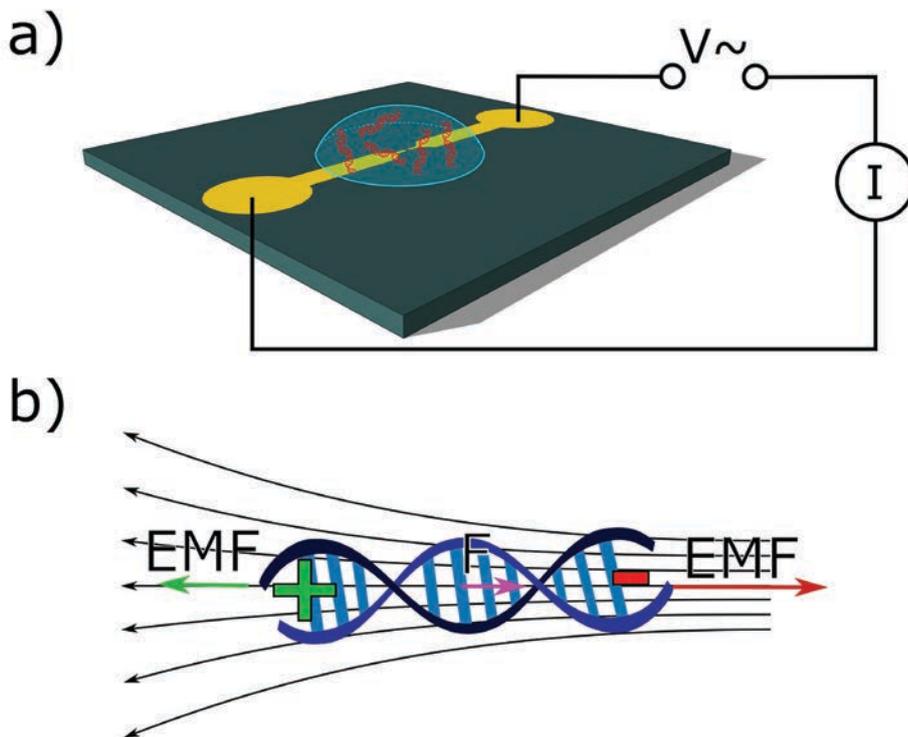


Bild 5. Im oberen Bild (a) ist der Probenchip mit DNA-Lösung schematisch dargestellt. Bild b) illustriert das Prinzip der Dielektrophorese. Das induzierte Dipolmoment bewirkt, dass die DNA über elektromotorische Kräfte (EMF) mit dem Feld in Wechselwirkung tritt. Die resultierende Kraft (F) beschleunigt das Molekül zum Bereich hoher elektrischer Feldstärken.

Einsatzes von DNA als Detektormaterial ist, dass auf die Verwendung von Wichtungsfaktoren für die verschiedenen Strahlungsarten verzichtet werden kann. Der direkte Nachweis der Strahlenschäden an der DNA ermöglicht deren Quantifizierung auch für unbekannte Strahlenszusammensetzungen.

Für diese Untersuchungen müssen die DNA-Moleküle zunächst zwischen leitenden Nanostrukturen elektrisch kontaktiert werden. So können Proben hergestellt werden, mit denen eine Charakterisierung des Widerstandsverhaltens der DNA möglich ist. Diese Proben werden in Zusammenarbeit mit der TU Braunschweig sowie den Abteilungen 2 und 5 der PTB hergestellt.

Die DNA-Moleküle werden dafür zu länglichen Strukturen (sogenannten DNA-Origamis) gefaltet. Diese haben eine Länge von ungefähr 200 nm. Die Enden der Strukturen werden mit Thiol-Gruppen versehen. Bei Kontakt mit einer Goldoberfläche kann sich das Schwefelatom des Thiols chemisch an das Gold binden. Diese Technik wird auch häufig für die Herstellung von selbstorganisierenden Monolagen (engl. *self-assembled monolayer*) verwendet. Hier soll sie jedoch dazu genutzt werden, um einzelne DNA-Origamis zwischen zwei Elektroden zu immobilisieren. Als Elektroden dienen Gold-Nanostrukturen, welche auf einem Siliziumchip aufgedampft werden.

Um ein Origami zwischen den Elektroden zu kontaktieren, wird diese unter der Ausnutzung der Dielektrophorese dort „eingefangen“. Die Origamis liegen in wässriger Lösung vor. Für den Einfang wird ein Tropfen dieser Lösung zwischen den Elektroden aufgebracht und eine Spannung an die Elektroden angelegt. Das so erzeugte elektrische Feld kann ein Dipolmoment im DNA-Origami induzieren, sodass es in Wechselwirkung mit dem Feld tritt. Die resultierende Kraft bewegt das Molekül zu den Spitzen, wo die elektrische Feldstärke am höchsten ist. Dieser Prozess ist in Bild 5 schematisch dargestellt. Durch die Thiol-Gold Bindungen bleiben die Moleküle letztendlich an den Elektroden haften.

Erste Brücken konnten bereits mit einer Frequenz von 15 MHz hergestellt werden. Bild 6 zeigt eine Rasterkraftmikroskopie-Aufnahme einer solchen Brücke aus DNA-Origamis.

Nach aktuellem Stand muss noch an einer Optimierung der Prozessparameter geforscht werden. Zum einen ist die Ausbeute an erfolgreich kontaktierten DNA-Strukturen noch sehr gering. Zum anderen wird angestrebt, möglichst nur ein einzelnes Origami einzufangen.

Für die Zukunft sollen mit diesem Verfahren auch andere DNA-Origami-Strukturen kontaktiert werden. So kann zum Beispiel der Einfluss der Länge

der DNA auf deren elektrisches Widerstandsverhalten untersucht werden.

### Bestimmung der dosimetrisch sensitiven Volumina kommerzieller Detektoren für die Dosimetrie in der Strahlentherapie mittels des Protonen-Mikrostrahls der PTB

Die Strahlentherapie stellt neben der Operation und der Chemotherapie eine Hauptform der Krebstherapie dar. Ein Großteil der strahlentherapeutischen Behandlungen wird mit klinischen Linearbeschleunigern durchgeführt, die Photonenstrahlung mit Maximalenergien im Bereich von 6 MeV bis 18 MeV erzeugen. Jede Patientenbestrahlung wird dabei individuell geplant und der bestrahlten Körperregion angepasst. Für die Berechnung der Bestrahlungspläne werden individuell angepasste Strahlungsfelder verwendet, für die eine exakte dosimetrische Charakterisierung notwendig ist. Durch die Einführung neuer Bestrahlungstechniken sowie die Entwicklung neuer Bestrahlungsgeräte werden immer kleinere Feldgrößen und komplexere Dosisverteilungen mit steilen Dosisgradienten ermöglicht. Die dosimetrische Charakterisierung dieser neuen Systeme stellt eine ständig zunehmende Herausforderung dar. Wegen ihres im Vergleich zu Ionisationskammern kleinen Volumens finden Festkörperdetektoren immer häufiger Anwendung in der Messung ionisierender Strahlung in der Strahlentherapie.

Die exakte Bestimmung des Messvolumens dieser Festkörperdetektoren war das Ziel dieser Forschungsarbeit am Protonen-Mikrostrahl der PTB. An den Beispielen des Diamantdetektors micro-Diamond und des Siliziumdetektors Diode E (PTW Freiburg) wurde die Tiefe und der Durchmesser des Volumens vermessen. Nach Beschleunigung von Protonen auf eine Energie von 10 MeV in einem Zyklotron wurde mit der Mikrostrahlanlage ein Protonenstrahl mit einem Durchmesser von ca. 7  $\mu\text{m}$  hergestellt. Zur Bestimmung des dosimetrisch sensitiven Durchmessers wurden die Detektoren in der Fokusebene des Mikrostrahls positioniert und in Mikrometerschritten quer zur Detektorachse abgescannt. Zur Bestimmung des dosimetrisch sensitiven Tiefenbereichs des Detektors diente zum einen die Absolutmessung des im Detektor erzeugten Ladungsträgerstroms im Vergleich zum Teilchenstrom der eingeschlossenen Protonen. Zum anderen wurde ein Aluminiumabsorber zwischen Strahl und Detektor eingebracht und in seiner Dicke variiert. Die Tiefenlage des Bragg-Peaks im Detektorvolumen wurde dadurch variiert, und aus der gemessenen Abhängigkeit des Detektorsignals von

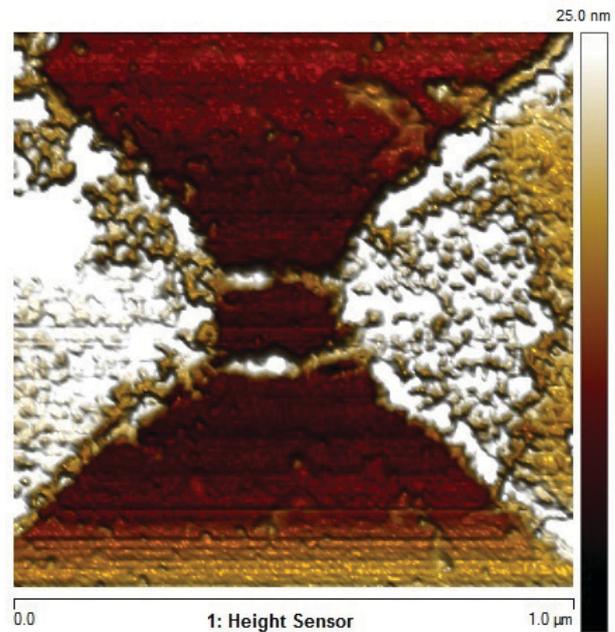


Bild 6. Die Aufnahmen wurden mittels eines Rasterkraftmikroskopes (engl. *atomic force microscope* - AFM) aufgenommen. Unten ist die Längenskala der Tafelenebene eingezeichnet. Die Farbskalierung (rechts) gilt für die Höhenverteilung. Links und rechts im Bild sieht man die beiden Goldelektroden als etwa dreieckige Strukturen. Dazwischen sind zwei Brücken zu erkennen. Diese bestehen jeweils aus ca. drei DNA-Origamis. Es handelt sich hier um ein 3D-Modell in Draufsicht, weswegen Schatten dargestellt sind.

der Aluminiumdicke im Vergleich zu einer Monte-Carlo-Simulation dieser Funktion konnte die Dicke des sensitiven Detektorvolumens bestimmt werden.

Für den Protonen-Mikrostrahl der PTB ist damit im Bereich der medizinischen Strahlentherapie ein neuer Anwendungsbereich, die Vermessung räumlich hochauflösender Strahlungsdetektoren, erschlossen worden.

# In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

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

## Grundlagen der Metrologie

### **Gammapektrometrie zur Darstellung der Aktivitätseinheit: Modernisierung und Erweiterung des Aktivitätsbereiches**

Grundlage einer jeden Ausgabe von Quellen (Lösung oder Festpräparat) an Kunden ist die Aktivitäts- und Verunreinigungsbestimmung. Die Gammapektrometrie ist ein wichtiges Standbein des Fachbereiches *Radioaktivität* zur Weitergabe der Aktivitätseinheit neben LSC und Ionisationskammernessungen. Entscheidend ist jedoch, dass die Gammapektrometrie das einzige Verfahren ist, das in der Lage ist Verunreinigungen zu erkennen und Isotopengemische zu quantifizieren. Damit kommt ihr eine Schlüsselrolle im hochfrequentierten Dienstleistungsbetrieb des Fachbereiches zu. Seit 2015 laufen deshalb intensive Infrastrukturmaßnahmen, begleitet von zahlreichen Machbarkeitsstudien zur strategischen Ausrichtung auf die hochwertigsten Dienstleistungen, um die Gammapektrometrie zukunftsfähig zu machen. (S. Röttger, FB 6.1, [stefan.roettger@ptb.de](mailto:stefan.roettger@ptb.de))

### **Kalorimetrische Bestimmung strahlungsqualitätsabhängiger Faktoren $k_Q$ von Ionisationskammern in hochenergetischen Elektronenfeldern zwischen 6 MeV und 20 MeV**

Die Bestimmung der Wasser-Energiedosis  $D_w$  für hochenergetische Elektronenstrahlung erfolgt typischerweise mithilfe von Ionisationskammern, die bei  $^{60}\text{Co}$ -Strahlung zur Anzeige der Wasser-Energiedosis kalibriert sind. Die Änderung des strahlungsqualitätsabhängigen Ansprechvermögens der Kammer wird dabei durch den sogenannten  $k_Q$ -Faktor berücksichtigt. Mithilfe eines Wasserkalorimeters wurden an den medizinischen Linearbeschleunigern der PTB experimentelle  $k_Q$ -Faktoren für Elektronenstrahlung für verschiedene Ionisationskammern (Flachkammer PTW 34001, Zylinderkammern FG 65G, NE2561 und NE2571) im Energiebereich zwischen 6 MeV und 20 MeV (zugehörige Strahlungsqualität  $R_{50}$  zwischen 1,9 cm und 7,5 cm) bestimmt. Die relativen Standardmessunsicherheiten der experimentell bestimmten  $k_Q$ -Faktoren liegen zwischen ca. 0,45 % und ca. 0,80 %. (A. Krauss, FB 6.2, [achim.krauss@ptb.de](mailto:achim.krauss@ptb.de))

### **Erster internationaler Vergleich der Primärnormale für die Wasser-Energiedosis bei Röntgenstrahlung**

Die PTB war Koordinator des ersten internationalen Vergleiches der Primärnormalmesseinrichtungen zur Darstellung der Einheit der Wasser-Energiedosis bei Röntgenstrahlungen mit Erzeugerspannungen zwischen 100 kV und 250 kV. Neben der PTB gibt es weltweit nur drei weitere nationale Metrologieinstitute, die derartige Primärnormale haben, nämlich in den Niederlanden, Frankreich und Italien. Die Ergebnisse des Vergleiches zeigen, dass die Primärnormale innerhalb ihrer erweiterten Unsicherheiten konsistent sind. Eine etwas differenziertere Analyse der Ergebnisse gibt Hinweise auf Verbesserungen an einigen Primärnormalen. (L. Büermann, FB 6.2, [ludwig.bueermann@ptb.de](mailto:ludwig.bueermann@ptb.de))

### **Detektor zur Messung der Myonen der kosmischen Strahlung MUDOS3**

Die seit mehreren Jahren in der PTB eingesetzten MUDOS-Systeme (**M**uon **D**osimetry **S**ystem) sind in der 3. Generation weiterentwickelt worden. Die Bauweise ist nun kompakter, wodurch das „Sichtfenster“ (der Öffnungswinkel) des Detektors vergrößert wird. Die Anzahl der Bauteile ist gegenüber dem Vorgängermodell reduziert. Die Wartungsfreundlichkeit konnte deutlich erhöht werden. Das Messprinzip basiert auf der Koinzidenzmessung zweier übereinander angeordneter Kammern, welche durch eine 20 mm starke Wolframscheibe gegeneinander abgeschirmt sind. Die hochenergetische Myonen-Strahlung durchdringt diese Scheibe im Gegensatz zu der niederenergetischeren terrestrischen Strahlung problemlos. In beiden Kammern gleichzeitig gemessene Ereignisse werden als Myon gewertet. Der neue MUDOS-Detektor wurde bei Messungen im Untergrundlabor UDO II und der Referenzmessfläche für Umgebungsdosimetrie erfolgreich eingesetzt. (J. Roth, FB 6.3, [juergen.roth@ptb.de](mailto:juergen.roth@ptb.de), B. Pullner, FB 6.3, [bjoern.pullner@ptb.de](mailto:bjoern.pullner@ptb.de))

### **Datenerfassungselektronik für ein ToT-Spektrometer mit mehreren Kanälen zur Messung von gepulster Strahlung**

Zur Spektroskopie von gepulster Röntgenstrahlung ist aufgrund der kurzen Strahlungsdauer und der hohen Dosisleistung eine schnelle Elektronik notwendig. Zur Messung des Spektrums eignet sich daher die Time-over-Threshold-Methode (ToT).

(P. Mathias, FB 6.3, pascal.mathias@ptb.de, B. Reinelt, FB 6.3, bjoern.reinelt@ptb.de)

## **Messungen der Neutronenflussraten in Untergrundlaboratorien**

Für verschiedene physikalische Experimente, die in Untergrundlaboratorien aufgebaut werden, ist die Kenntnis der Flussrate und Energieverteilung der Neutronen eine wichtige Voraussetzung. In einer Messkampagne mit einer Kugel des PTB-Bonner-Kugel-Spektrometers wurde die Neutronenflussrate im Untergrundlabor Felsenkeller gemessen. Zusätzliche Messungen wurden im Untertagelaboratorium UDO II der PTB durchgeführt. (M. Zboril, FB 6.4, miroslav.zboril@ptb.de)

## **Dreifach-differentielle Ionisationsquerschnitte von Wassermolekülen durch Elektronenstoß**

Dreifach-differentielle Ionisationsquerschnitte von Wassermolekülen durch Elektronenstoß wurden mit einer genaueren theoretischen Methode berechnet. (W. Y. Baek, FB 6.5, woonyong.baek@ptb.de)

## **Immobilisierung von DNA-Origamis zwischen Gold-Elektroden**

Zum direkten Nachweis von strahleninduzierten Schäden an der DNA mittels Impedanzmessung wurden DNA-Origamis zwischen zwei Gold-Elektroden eingefangen. (F. Heimbach, FB 6.5, florian.heimbach@ptb.de)

## **Bestimmung des effektiven Ladungszustands von Kohlenstoffprojektilen in der Bragg-Peak-Region**

Der effektive Ladungszustand von Kohlenstoffprojektilen mit Energien von 1 MeV bis 6 MeV in flüssigem Wasser wurde bestimmt. (J. Rahm, FB 6.5, johannes.rahm@ptb.de)

## **Einbeziehung der Gasströmung in der Simulation der ortsabhängigen Nachweiswahrscheinlichkeit des PTB-Nanodosimeters**

Die Einbeziehung der Daten aus Gasströmungssimulationen erweitert die Simulation der räumlichen Verteilung der Nachweiswahrscheinlichkeit für die ionisierten Gasmoleküle des Targetgases um eine wesentliche Einflussgröße und stellt damit diese Simulationen auf eine solidere Basis. (G. Hilgers, FB 6.5, gerhard.hilgers@ptb.de)

## **Erste Untersuchungen zur Unsicherheit der ortsabhängigen Nachweiswahrscheinlichkeit des PTB-Nanodosimeters**

Zur Ermittlung ihrer Unsicherheit wurde die Abhängigkeit der räumlichen Verteilung der Nachweiswahrscheinlichkeit für die ionisierten Gasmoleküle des Targetgases von den Betriebsparametern des PTB-Nanodosimeters systematisch mit Messungen untersucht. (G. Hilgers, FB 6.5, gerhard.hilgers@ptb.de)

## **Entwicklung eines neuen, optimierten Präzisions-Pulsgenerators für die Gamma-Spektrometrie**

Für die Rückführung der Aktivitätseinheit auf einen Zeitstandard wurde ein Präzisions-Pulsgenerator entwickelt. Dieser simuliert mit genau bekannter Rate Messsignale des Detektors und speist diese parallel zum Detektor in das Messsystem ein. Das Gerät dient der präzisen Erfassung der Totzeit des Messsystems und somit der Bestimmung der effektiven Messzeit. (D. Mugai, FB 6.5, detlef.mugai@ptb.de)

## **Simulation der Dosisverstärkung durch Goldnanopartikel**

Die berechnete Dosisverstärkung in der Umgebung eines Goldnanopartikels bei Bestrahlung mit klinischen Photonenquellen ist signifikant (bis zu 300 nm Abstand mindestens Faktor 10). Eine Dosiserhöhung im Zellkern für eine typische Nanopartikel-Konzentration im Zytoplasma liegt aufgrund der Absorption in benachbarten Nanopartikeln niedriger, kann aber dennoch Faktoren von 2 oder höher erreichen. (M. Bug, FB 6.5, marion.bug@ptb.de, T. Dressel, FB 6.5, tobias.dressel@ptb.de)

## **Vorbereitende Messungen zur Bestimmung der Elektronenemission aus Goldnanopartikeln**

Die Elektronenemission an dünnen Folien und darauf aufgebracht Goldnanopartikeln wurde für Elektronen- und Protonenstrahlen gemessen. (B. Rudek, FB 6.5, benedikt.rudek@ptb.de, M. Bug, FB 6.5, marion.bug@ptb.de)

## **Fragmentierung von Methanol und Tetrahydrofuran bei Elektronen- und Protonenbestrahlung**

Absolute Fragmentierungsquerschnitte für den Aufbruch von Methanol und Tetrahydrofuran bei Elektronen- und Protonenbestrahlung wurden gemessen. (B. Rudek, FB 6.5, benedikt.rudek@ptb.de)

## **Abschluss der Bestimmung von Wirkungsquerschnitten für Ionisationswechselwirkung von DNS-Bausteinen für Protonenstoß**

Differentielle und totale Wirkungsquerschnitte für die Ionisierung von unterschiedlichen DNS-Bausteinen durch Protonenstoß wurden mittels Elektronenspektroskopie experimentell bestimmt. (M. Wang, FB 6.5, mingjie.wang@ptb.de)

### **Bestimmung der dosimetrisch sensitiven Volumina kommerzieller Detektoren für die Dosimetrie in der Strahlentherapie mittels des Protonen-Mikrostrahls der PTB**

Die Strahlentherapie stellt neben der Operation und der Chemotherapie eine Hauptform der Krebstherapie dar. Ein Großteil der strahlentherapeutischen Behandlungen wird mit klinischen Linearbeschleunigern durchgeführt, die Photonenstrahlung mit Maximalenergien im Bereich von 6 MeV bis 18 MeV erzeugen. (D. Poppinga, AG Medizinische Strahlenphysik, Carl von Ossietzky Universität, Oldenburg, daniela.poppinga@uni-oldenburg.de, D. Harder, Medizinische Physik und Biophysik, Georg August Universität, Göttingen, Dietrich-Harder@t-online.de, U. Giesen, FB 6.5, ulrich.giesen@ptb.de)

### **Metrologie für die Wirtschaft**

#### **Alphaspektrometrie unter definiertem Raumwinkel zur Darstellung der Aktivitätseinheit**

Mit der wieder in Betrieb genommenen und erweiterten Messeinrichtung zur Alphaspektrometrie unter definiertem Raumwinkel können Quellen alphastrahlender Radionuklide kalibriert werden, die durch elektrolytische Abscheidung auf kreisrunden Probenträgern hergestellt wurden. Ein vollständig neues Alphaspektrometer mit Schnellwechsellösung für kurzlebige Nuklide wurde konzipiert, konstruiert und gebaut (6.1, 6.4, 5.5). (S. Röttger, FB 6.1, stefan.roettger@ptb.de)

#### **PTB stärkt die Bauartprüfung nach Röntgenverordnung**

Um der durch das neue Strahlenschutzgesetz (StrlSchG) in 2018 zukünftig auf die PTB zukommenden Verantwortung gerecht zu werden, modernisiert die PTB den Bereich der Bauartprüfung nach RöV. Ein Schwerpunkt ist dabei die funktionale Sicherheit, d. h. die Neuausrichtung des Leitfadens Dos-49 für Hersteller und Gutachter nach DIN EN 62061. (A. Röttger, FB 6.3, annette.roettger@ptb.de)

### **Metrologie für die Gesellschaft**

#### **Aktivitätsbestimmungen von Germanium-68/Gallium-68 – ein Beitrag für die Nuklearmedizin**

Die Bestimmungen der Aktivität einer Germanium-68/Gallium-68-Lösung konnte mittels einer neuen Koinzidenzmethode mit kleinen Unsicherheiten realisiert werden. Die Messungen erfolgten im Rahmen einer internationalen Vergleichsmessung und spielen auch für die Medizin eine große Rolle, da Germanium-68/Gallium-68 dort oft für

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

#### **Kommissionierung eines Elektromagneten für dosimetrische Grundlagenuntersuchungen in der MR-geführten Strahlentherapie**

Für dosimetrische Grundlagenuntersuchungen im Rahmen der MR-geführten Strahlentherapie, wie z. B. die Bestimmung des Ansprechvermögens dosimetrischer Detektoren im Magnetfeld oder des Einflusses des Magnetfeldes auf die 3-dimensionale Dosisverteilung im Phantom, wurde ein starker Elektromagnet beschafft. Er kann bei einem Polschuhdurchmesser von ca. 25 cm und einem Polschuhabstand von 10 cm eine magnetische Flussdichte von mehr als 1 T erzeugen. Zur genauen Charakterisierung der Eigenschaften des erzeugten Magnetfeldes wurde ein Messstand (inkl. der zugehörigen Software) aufgebaut, der eine automatisierte Messung der magnetischen Flussdichte mithilfe einer Hall-Sonde an beliebigen Positionen zwischen den Polschuhen und in der Umgebung des Magneten (Streufeld) ermöglicht. Mit diesem Messstand wurden z. B. die räumliche Verteilung der magnetischen Flussdichte in verschiedenen Ebenen zwischen den Polschuhen des Magneten, die Abhängigkeit der magnetischen Flussdichte von der elektrischen Stromstärke oder die Langzeitstabilität der magnetischen Flussdichte bei Dauerbetrieb des Elektromagneten bestimmt. Diese Informationen werden für die in Zukunft geplanten dosimetrischen Grundlagenuntersuchungen benötigt. (R.-P. Kapsch, FB 6.2, ralf-peter.kapsch@ptb.de)

#### **Quantifizierung der Bildqualität am CT mittels „task specific quality assessment“**

In einem gemeinsamen Forschungsvorhaben der beiden Abteilungen *Ionisierende Strahlung* und *Medizinphysik* soll die Qualität von Bildern am CT quantifiziert werden. Ziel ist es, eine bessere Beurteilung und Vergleichbarkeit unterschiedlicher Geräte und Rekonstruktionsverfahren zu ermöglichen. Basis für die Beurteilung sind sogenannte „model observer“, die eine automatische Klassifikation von Bildern durchführen. In einem ersten Schritt des Vorhabens werden Unsicherheitsanalysen für die Güte dieser Verfahren durchgeführt und mittels realer Messungen erprobt. (M. Anton, FB 6.2, mathias.anton@ptb.de, M. Reginatto, FB 6.4, marcel.reginatto@ptb.de, C. Elster, FB 8.4, clemens.elster@ptb.de)

### Personalisierte Dosimetrie in der CT

Das kürzlich angelaufene EMPIR-Projekt 15HLT05 mit dem Titel „Metrology for multi-modality imaging of impaired tissue perfusion“ befasst sich mit der Metrologie für die quantitative Analyse von Durchblutungsstörungen der Herzkranzgefäße mit unterschiedlichen bildgebenden Verfahren zur Früherkennung von koronaren Herzerkrankungen. Neben anderen bildgebenden Verfahren werden auch Computertomografen für derartige Perfusionsstudien verwendet. Dabei soll die nicht unerhebliche Strahlenexposition des Patienten so gering wie möglich gehalten werden. Dazu ist eine präzise Bestimmung der effektiven Dosis des Patienten wichtig. Ein Arbeitspaket dieses Projektes beschäftigt sich daher mit der personalisierten Dosimetrie in der CT mit dem Ziel, die Unsicherheiten in der Bestimmung der effektiven Dosis des Patienten deutlich zu verringern. Diese Thematik wird unter Leitung der PTB zusammen mit den anderen europäischen Partnern bearbeitet. (S. Rosendahl, FB 6.2, stephan.rosendahl@ptb.de)

### PTB-Referenzfelder zur Prüfung von Dosimetern in gepulsten Röntgen-Strahlungsfeldern erfüllen die Anforderungen der neuen ISO/TS 18090-1

Nach Erscheinen der ISO/TS 18090-1 im August 2015 wurde die Anlage der PTB zur Prüfung von Dosimetern in gepulsten Röntgen-Strahlungsfeldern (20 keV bis 100 keV) anhand dieser Anforderungen noch einmal charakterisiert und überprüft. Dabei wurde der Parameterbereich (400  $\mu$ s bis 10 s) ermittelt, in dem die Anlage gemäß dieser Spezifikation als Referenzanlage für gepulste Röntgen-Strahlung gilt. (S. Friedrich, FB 6.3, sabrina.friedrich@ptb.de; O. Hupe, FB 6.3, oliver.hupe@ptb.de)

### Messvergleich von Augendosimetern

Es wurde ein Messvergleich für Augenlinsendosimeter für die Messgröße  $H_p(3)$  durchgeführt – erstmalig mit sowohl Photonen- als auch Betastrahlung. (R. Behrens, FB 6.3, rolf.behrens@ptb.de)

### Dosimetrie für die Brachytherapie in der PTB neu aufgestellt

Das Gebiet der Dosimetrie für die Brachytherapie für Photonenstrahlung in der PTB ist seit Januar 2016 neu aufgestellt. Standard-Kalibrierangebote und neue Forschungsbereiche werden sowohl von erfahrenem als auch von neuem Personal bearbeitet. (R. Behrens, FB 6.3, rolf.behrens@ptb.de)

### Messungen des Sekundärneutronenfeldes an der OncoRay-Protonentherapieeinrichtung in Dresden

Bei der Protonentherapie ist der Patient einer Sekundärstrahlung aus Neutronen, Photonen und geladenen Teilchen ausgesetzt. Neutronenstrahlung kann dabei den größten Beitrag zur Dosis außerhalb des Zielvolumens liefern. Insbesondere bei pädiatrischen Behandlungen und der Bestrahlung von Schwangeren ist diese Dosis von Bedeutung, da die Schädigung gesunden Gewebes Sekundärtumore induzieren kann. Um das Risiko für die Entstehung von Sekundärtumoren einschätzen zu können, ist es daher wichtig, die bei der Bestrahlung entstehende zusätzliche Dosis möglichst genau zu kennen. In einer Kollaboration mit dem Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (HZDR) hat die PTB Messungen der Neutronenenergieverteilungen an der OncoRay-Protonentherapieeinrichtung in Dresden (Universitätsklinikum Carl Gustav Carus Dresden) durchgeführt. Die Messungen werden genutzt, um Computersimulationsrechnungen zu validieren, die die Basis für die Bestimmung der Neutronendosis im Patienten bilden. (M. Reginatto, FB 6.4, marcel.reginatto@ptb.de)

### Projekt zum Aufbau eines direkt anzeigenden Astronautendosimeters erfolgreich abgeschlossen

Der Franzose Thomas Pesquet nutzt als erster Astronaut ein mobiles Dosimeter, das die Strahlungsdosis sofort anzeigt – entwickelt von der PTB und europäischen Partnern. (M. Luszik-Bhadra, FB 6.4, marlies.luszik-Bhadra@ptb.de)

### Internationale Angelegenheiten

#### Neue Messgrößen im Strahlenschutz?!

Die ICRU bereitet im Rahmen des *Report Committee 26 on Operational Radiation Protection Quantities for External Radiation* ein neues Konzept für die Definition der Messgrößen des Strahlenschutzes vor. Rolf Behrens wurde als Member in 2016 berufen. (R. Behrens, FB 6.3, rolf.behrens@ptb.de)

#### Großer Messvergleich im Rahmen eines EMRP-Projektes durchgeführt

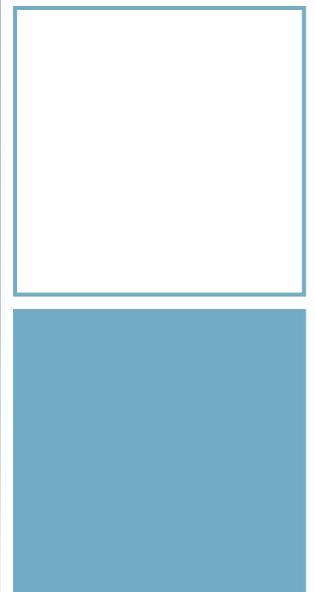
Teilnehmer aus sieben Ländern, unter ihnen Netzbetreiber aus fünf Staaten, brachten im Rahmen des EMRP-Projekts *MetroERM radiological early warning* ihre Dosimeter zu Testzwecken zur PTB. In diesem Messvergleich wurden grundlegende metrologische Parameter der Dosimeter bestimmt. (H. Dombrowski, FB 6.3, harald.dombrowski@ptb.de, S. Neumaier, FB 6.1, stefan.neumaier@ptb.de, A. Röttger, FB 6.3 annette.roettger@ptb.de)

### **Kleinbeschleuniger für Ionen und Molekülfragmente für Energien von 3 eV bis 1000 eV**

Zur Untersuchung geeigneter Oberflächen für die Konversion langsamer Ionen zu Elektronen für das neue Tracking-Imaging-Nanodosimeter wurde ein Kleinbeschleuniger aufgebaut. Er erzeugt selektierte Ionen im Energiebereich 3 eV bis 1000 eV und ermöglicht die systematische Suche nach geeigneten Konvertermaterialien. (V. Dangendorf, FB 6.5, volker.dangendorf@ptb.de)

# Abteilung 7

## Temperatur und Synchrotronstrahlung



## Institut Berlin

Das Institut Berlin der PTB wurde neuer Partner im Netzwerk „Campus Charlottenburg“, welches die Gründungsmitglieder TU Berlin, UdK Berlin und den Bezirk Charlottenburg-Wilmersdorf hat und jetzt aus 14 Partnern besteht. Gefeierte wurde dieser Schritt im Hermann-von-Helmholtz-Bau der PTB auf dem Jahresempfang des Netzwerkes am 27. Oktober 2016 in Anwesenheit zahlreicher prominenter Gäste (Bild 1). Die PTB hatte dabei die Gelegenheit, sich vorzustellen.



Bild 1: Interview mit der Moderatorin K. Gerlach, Bezirksbürgermeister R. Naumann, TU-Vizepräsidentin Prof. A. Ittel und UdK-Präsident Prof. M. Rennert

## Abteilung 7 Temperatur und Synchrotronstrahlung

### Metrologie mit Synchrotronstrahlung

Auf dem Gebiet der Metrologie mit Synchrotronstrahlung hat die PTB eine weltweite Führungsposition. Voraussetzung dafür ist eine apparative Ausstattung, die den stetig steigenden Anforderungen von Kunden und Kooperationspartnern aus Forschung und Industrie entspricht. So wurde im PTB-Laboratorium am Berliner Elektronenspeicherring BESSY II mit Mitteln der Europäischen Weltraumorganisation ESA ein Strahlrohr aufgebaut, mit dem Optiken für die Röntgenmission ATHENA charakterisiert werden sollen (Bild 2). Für die Untersuchung von Oxid- und Kontaminationsschichten auf Silizium-Kugeln des Avogadro-Projektes zur Neudefinition der Basiseinheit Kilogramm wurde eine Apparatur entwickelt, die Röntgenspektrometrie mit Elektronenspektroskopie kombiniert (Bild 3). Diese Apparatur wurde nach Braunschweig transfe-

riert und dient dort zur Routine-Charakterisierung von Si-Kugeln.

Eine Reihe von instrumentellen Weiterentwicklungen bezieht sich derzeit auf das Gebiet der EUV-Radiometrie. Dabei stehen die Vermeidung von Oberflächenkontaminationen auf optischen Oberflächen durch schmiermittelfreie Vakuummechaniken genauso im Fokus wie neue Messtechniken zur orts aufgelösten Reflektometrie oder zur EUV-Scatterometrie, mit denen Nanostrukturen auf Oberflächen untersucht werden. Diese Form der dimensionellen Nanometrologie spielt eine immer größer werdende Rolle bei den zahlreichen Industriekooperationen zur Entwicklung der EUV-Lithografie (Extrem-Ultraviolett-Lithografie, EUVL) im Bereich Halbleiterfertigung. Die älteste und bedeutendste dieser Kooperationen mit der Carl Zeiss SMT GmbH wurde jetzt in einem 8. Nachtrag bis Ende 2020 verlängert.

Die Nanometrologie mit Synchrotronstrahlung bietet auch interessante Themen für eine Reihe von Doktorarbeiten. So wurde Jan Wernecke für seine Arbeit „When size does matter: Dimensional metrology of nanostructured layers and surfaces using X-rays“ mit dem Ernst-Eckhard-Koch-Preis 2016 des Freundeskreises Helmholtz-Zentrum Berlin ausgezeichnet. Bei diesen und darüber hinausgehenden Arbeiten zur Metrologie von Materialparametern durch Streuexperimente und Spektrometrie mit Synchrotronstrahlung ist die Vernetzung mit externen Forschergruppen von großer Bedeutung. Die Zusammenarbeit mit dem Helmholtz-Zentrum Berlin auf dem Gebiet der Röntgenkleinwinkelstreuung wurde kürzlich bis Ende 2020 verlängert und eine neue zur VUV-Elektronenspektroskopie mit der Technischen Universität Bergakademie Freiberg vereinbart.

Eine zerstörungsfreie tiefenabhängige Charakterisierung nanoskaliger Schichtsysteme ist ein essentielles Thema in vielen Bereichen der aktuellen Forschung. Dabei sind sogenannte Nanolaminat-Schichten, wobei es sich um Stapel aus mehreren ultra-dünnen Schichten handelt, von besonderem technologischem Interesse. Die metrologischen Herausforderungen bei der tiefenabhängigen Charakterisierung derartiger Schichtstapel erfordern eine Weiterentwicklung der zur Verfügung stehenden analytischen Methoden. Die kombinierte Analyse mittels Röntgenfluoreszenzanalyse unter streifenförmigem Einfall (GIXRF) und Röntgenreflektometrie (XRR) kann einen Beitrag zur Beantwortung derartiger Fragestellungen leisten. Jedoch führt der

Titelbild:

Dielektrizitätskonstanten-Gasthermometer zur Bestimmung der Boltzmann-Konstante



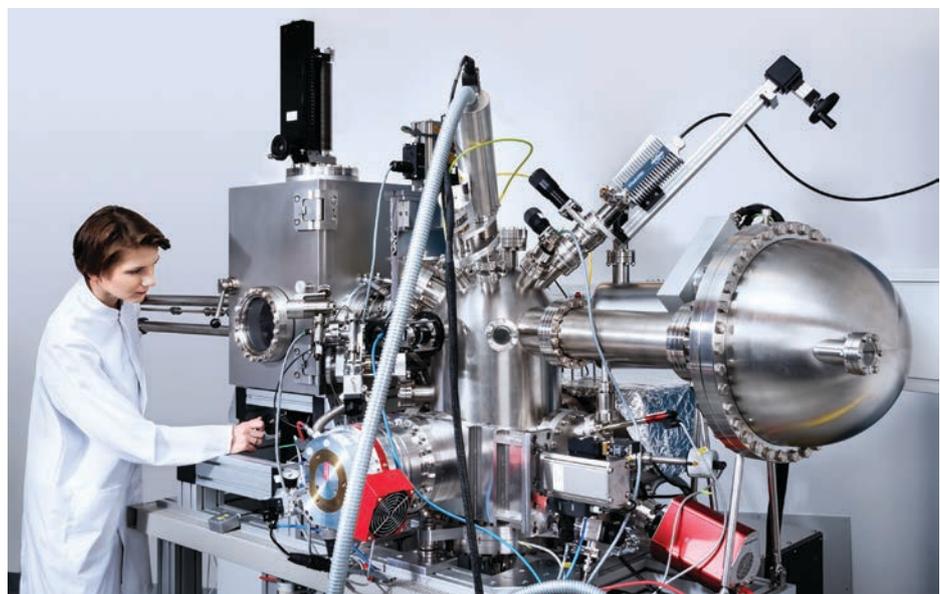
Bild 2: Reinraum mit Vakuumkammer für den Hexapod des neuen Strahlrohres bei BESSY II zur Charakterisierung von Röntgenoptiken in Zusammenarbeit mit der ESA

dabei derzeitig praktizierte konventionelle Ansatz, die Dichte, die Dicke und die Rauigkeit einer jeden Schicht als Modellparameter zu nutzen, schnell zu einer Vielzahl von Modellfreiheitsgraden, was sich negativ auf die Zuverlässigkeit der extrahierten Ergebnisse auswirken kann.

Im Rahmen einer Doktorarbeit wurde deshalb eine neuartige kombinierte Methodik aus referenzprobenfreier GIXRF und XRR entwickelt. Durch den referenzprobenfreien Ansatz zur quantitativen Auswertung der GIXRF-Experimente, welcher auf der Nutzung radiometrisch kalibrierter Instrumentierung und der Kenntnis der atomaren Fundamentparameter basiert, bietet diese neue Methodik einen Zugang zu den Massenbelegungen (also dem Produkt aus Dichte und Dicke eines Materials) der

interessierenden Elemente. Durch eine Kenntnis dieser Massenbelegungen kann die Anzahl der Modellfreiheitsgrade stark reduziert werden, wodurch die Zuverlässigkeit der modellierten GIXRF-XRR-Ergebnisse deutlich erhöht wird. Das Verfahren wurde am Beispiel von verschiedenen Nanolaminat-Schichtstapeln aus  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - und  $\text{HfO}_2$ -Schichten entwickelt (Bild 4). Verschiedene relevante atomare Fundamentparameter wurden in dedizierten Experimenten neu bestimmt, um die experimentellen Unsicherheiten der mit referenzprobenfreier GIXRF bestimmten Massenbelegungen reduzieren zu können und damit eine zuverlässige tiefenabhängige Charakterisierung der Nanolaminat-Systeme zu ermöglichen.

Bild 3: Apparatur für kombinierte Röntgen- und Elektronenspektrometrie an Oberflächen von Silizium-Kugeln



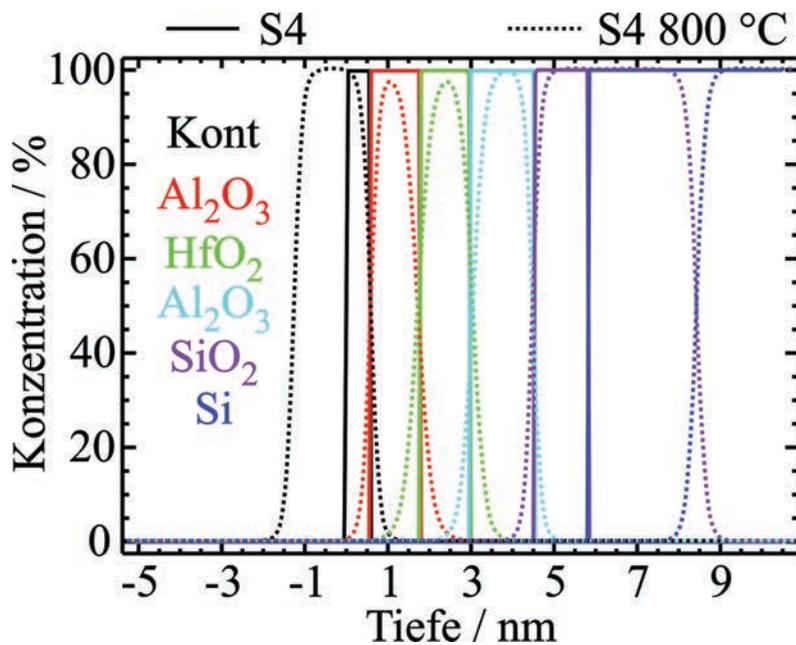


Bild 4: Vergleich der bestimmten Konzentrationstiefenprofile eines ungetemperten Nanolaminat-Stapels ( $\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{HfO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3 / \text{SiO}_2$ ) mit einem bei  $800\text{ }^\circ\text{C}$  getemperten Stapel mit gleicher Schichtfolge. Die neuartige kombinierte Methodik aus referenzprobenfreier GIXRF und XRR mit Synchrotronstrahlung ermöglicht eine zuverlässige Charakterisierung der Grenzflächendurchmischung durch die Temperung.

## Kryosensorik

Die Arbeitsgruppe Optoelektronik und Quantenbauelemente der Technischen Universität Berlin entwickelt Einzelphotonenemitter und Mikrolaser auf der Basis von Halbleiter-Quantenpunkten und ist gemeinsam mit der PTB an einem europäischen Projekt zur optischen Einzelphotonen-Metrologie beteiligt. Die hocheffizienten Quantenpunkt-Quellen einzelner bzw. weniger Photonen kommen als vielversprechende Komponenten für zukünftige Quantenkommunikationssysteme in Betracht. Im Rahmen der Kooperation wurde ein Messsystem zur Charakterisierung von Einzelphotonenquellen und Mikrolasern im nah-infraroten Wellenlängenbereich aufgebaut. Das aufgebaute Messsystem wird zur Bestimmung der Emissionsstatistik der Quellen eingesetzt und ist zusammen mit den dazu entwickelten Analyseverfahren eine bedeutende Ergänzung zu bisherigen Untersuchungsmethoden. Supraleitende Transition-Edge-Sensor-Mikrokalorimeter, die vom National Institute of Standards and Technology (NIST, USA) bereitgestellt wurden, und PTB-SQUID-Stromsensoren zu deren Auslesung bilden photonenzahl-auflösende Detektoren, die in einem Tieftemperaturkühler bei unter  $100\text{ mK}$  betrieben werden (Bild 5). Durch Lichtwellenleiter sind die Quantenpunkt-Quellen mit den Detektormodulen verbunden. Das neue Messsystem ist eine Weiterentwicklung eines bereits erfolgreich für ein sogenanntes schlupflochfreies Bell-Experiment mit verschränkten optischen Photonen an der Österreichischen Akademie der Wissenschaften eingesetzten Aufbaus. Die TES/SQUID-Detektoren ermöglichen die direkte Bestimmung der Photonenanzahlverteilungen der Quantenpunkt-Quellen

unter variierenden Betriebsbedingungen. Aus den gemessenen Verteilungen können z. B. die Anteile von thermischem und kohärentem Licht und daraus zeitliche Korrelationsfunktionen höherer Ordnung bei  $\tau = 0$  ermittelt werden (Bild 6).

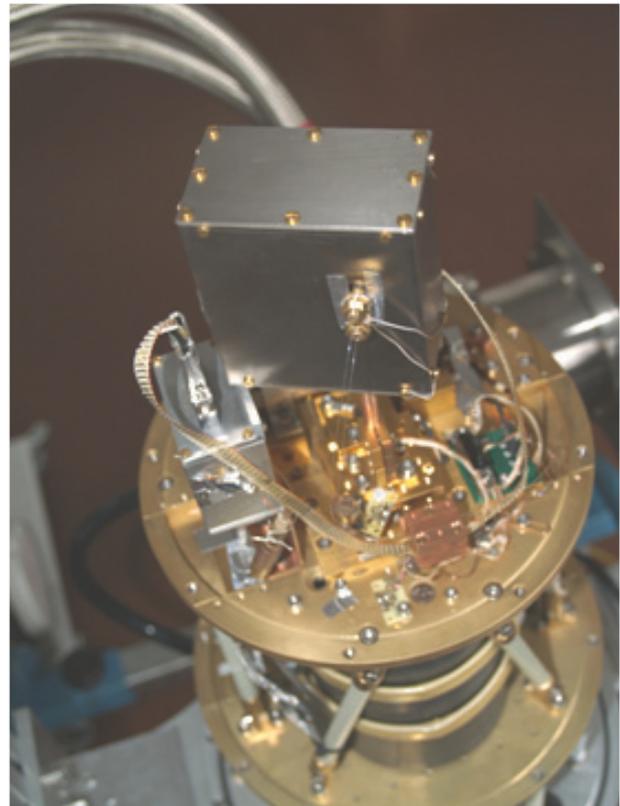


Bild 5: TES/SQUID-Detektormodul (Innenansicht des Kryostaten ohne Strahlungsschirme). Innerhalb der supraleitenden magnetischen Schirmung aus Titan befinden sich die Detektoren. Die TES-Detektoren sind mit Lichtwellenleitern (LWL) verbunden, die zusätzlich thermisch geankert sind.

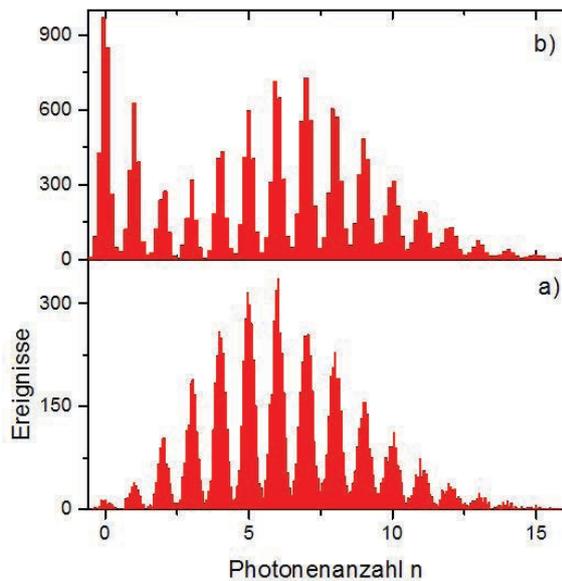


Bild 6: Photonenzahl-Verteilung von Quantenpunkt-Mikrolasern mit einer Emissionswellenlänge von 850 nm. a) die Statistik folgt einer Poissonverteilung (kohärentes Licht). b) lineare Kombination aus einer geometrischen und einer Poissonverteilung (thermisches und kohärentes Licht)

## Thermometrie

Für die Temperaturmetrologen besonders bedeutsam war die alle drei Jahre stattfindende Konferenz „International Symposium on Temperature and Thermal Measurements in Industry and Science“, kurz TEMPMEKO (Bild 7). Im Juni 2016 trafen sich in Zakopane, Polen, 370 führende Wissenschaftler aus 46 Ländern. Die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler diskutierten in über 380 Beiträgen u. a. neue Entwicklungen auf dem Gebiet der Skalendarstellung und Weitergabe, der Entwicklung neuartiger Sensoren und der neuen Definition des Kelvins. Die Thermometriker aus der PTB waren mit 29 Beiträgen ihrer internationalen Bedeutung

entsprechend beteiligt. Die nächste Konferenz der Reihe findet 2019 in Beijing statt und wird vom chinesischen Metrologieinstitut NIM veranstaltet.

Genau und rückgeführte Temperaturmessungen im Rahmen der strahlungsthermometrischen Erdfernerkundung haben für die Klimabeobachtung zunehmende Bedeutung und erfordern eine enge Zusammenarbeit von Thermometrikern und Klimaforschern. Auf der TEMPMEKO hat die PTB ihre Arbeiten im Rahmen des europäischen Forschungsvorhabens „Metrology for Earth Observation and Climate 2“ vorgestellt. Dabei wurden von der PTB rückgeführte Temperatur- und Teilchendichtebestimmungen in der hohen Erdatmosphäre durch die flugzeuggetragene Infrarot-Hyperspektralkamera GLORIA gezeigt (Bild 8) und das Kalibrierkonzept für das erdgestützte *Network for the Detection of Mesospheric Change* (NDMC) vorgestellt. Das NDMC beobachtet weltweit mit infrarot-spektroskopischen Methoden langfristige Temperaturtrends in der oberen Atmosphäre.

Im Rahmen einer Zusammenarbeit mit dem South China National Centre of Metrology wurden in der PTB Miniaturtiegel aus drei verschiedenen keramischen Materialien (Bild 9) sowie zwei verschiedenen Designs mit hochreinem Palladium als Fixpunktmaterial gefüllt und metrologisch untersucht. Die Ergebnisse zeigten eine Übereinstimmung der Schmelztemperaturen aller Fixpunkte innerhalb eines Temperaturintervalls von  $\pm 0,25$  K. Gleichzeitig konnte die Lebensdauer der Miniaturfixpunktzellen auf Basis des neuartigen Designs, der optimierten Füllprozedur und der Festlegung validierter Prozessparameter gegenüber den bisher verwendeten Tiegeln erheblich um den Faktor 5 verlängert werden. Die optimierten Tiegel sind im Routineeinsatz zur Kalibrierung von Thermoelementen.

Bild 7: Das IMEKO-Komitee „Temperature and Thermal Measurements“ auf der TEMPMEKO 2016



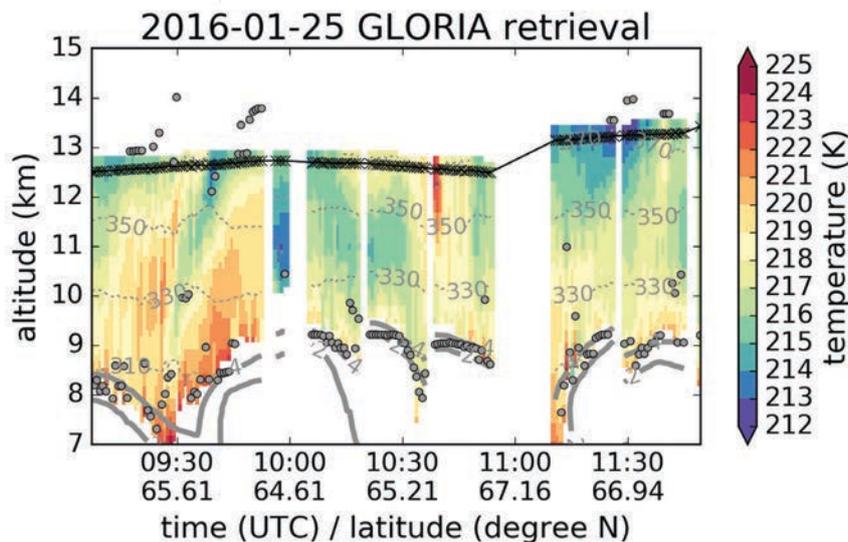


Bild 8: Ein von der Infrarot-Hyperspektralkamera GLORIA während eines Fluges westlich von Island im Winter 2016 aufgenommenes Temperaturprofil der hohen Atmosphäre. Das vom KIT und dem FZJ auf dem Forschungsflugzeug HALO betriebene Instrument liefert mithilfe von der Universität Wuppertal und der PTB entwickelten und charakterisierten Temperatur-Referenzstrahlern Messungen der Atmosphärentemperatur, die auf die Internationale Temperaturskala zurückgeführt sind.

Das rund 10 Jahre laufende Boltzmann-Projekt der PTB zur Neudefinition der Basiseinheit Kelvin konnte erfolgreich abgeschlossen werden. Die entscheidenden Messungen mit dem Dielektrizitätskonstanten-Gasthermometer haben einen Wert für die Boltzmann-Konstante mit einer relativen Messunsicherheit von 1,9 Millionstel (1,9 ppm) ergeben. Dieser letzte Schritt konnte in den vergangenen zwei Jahren durch laufende Verbesserung der verwendeten Kondensatoren und insbesondere durch die hochgenaue Messung ihrer elastischen Eigenschaften mit resonanter Ultraschall-Spektroskopie erreicht werden (siehe auch unter Nachrichten des Jahres und das Titelbild der Abteilung 7). Damit ist die Bedingung des Konsultativkomitees für Thermometrie (CCT) erfüllt, die Boltzmann-Konstante unter Anwendung von zwei fundamental unterschiedlichen Methoden mit Messunsicherheiten jeweils unter 3 ppm zu bestimmen, und einer Neudefinition des Kelvins über die Festlegung der Boltzmann-Konstante steht nichts mehr entgegen.

Das an der PTB perfektionierte Dielektrizitätskonstanten-Gasthermometer wird nun in einer erweiterten Variante zur Anwendung gebracht. Ziel ist es, Realgaseigenschaften mit einer neuartigen Kombination von dielektrischen Messungen und Expansionstechniken zu untersuchen. Damit können die verschiedenartigen Wechselwirkungen der Gasteilchen bestimmt werden. Die Apparatur (Bild 10) wird zunächst an Edelgasen erprobt, um im Anschluss daran Gasgemische zu untersuchen. Im Fokus stehen dabei Wasserstoff-Methan-Mischungen, die im Zuge der Energiewende beim Einspeisen von regenerativ erzeugtem Wasserstoff ins Erdgasnetz entstehen. Die bestimmten Stoffdaten sind vor allem für eine genaue Abrechnung, aber auch für die fundierte Aufstellung von Zustandsgleichungen notwendig.

Der spektrale Emissionsgrad von Oberflächen bei hohen Temperaturen (> 1000 K) ist für technische Anwendungen wie z. B. in der Strahlungs- und Lichterzeugung, bei Verbrennungsprozessen so-

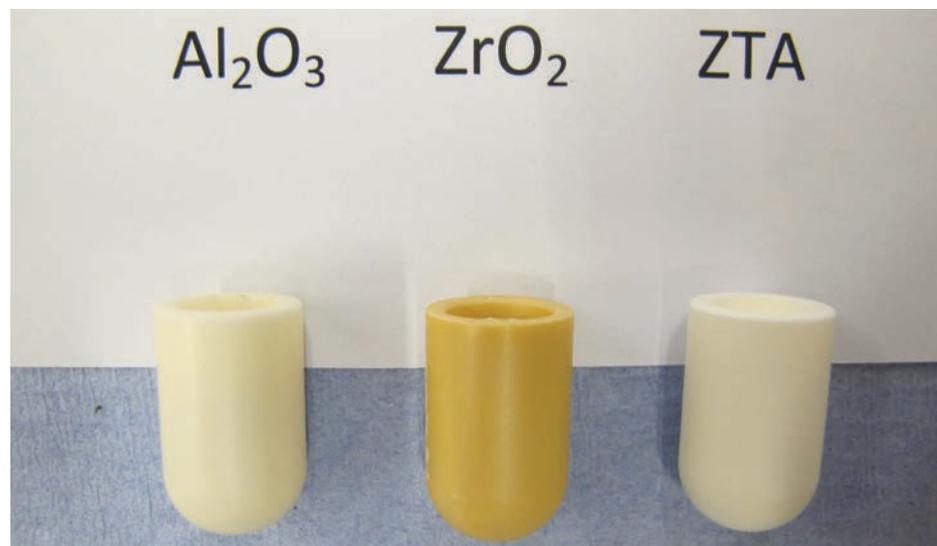


Bild 9: Miniaturtiegel aus drei verschiedenen keramischen Materialien ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZrO}_2$  und der Mischung ZTA aus  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (86 %) +  $\text{ZrO}_2$  (14 %))

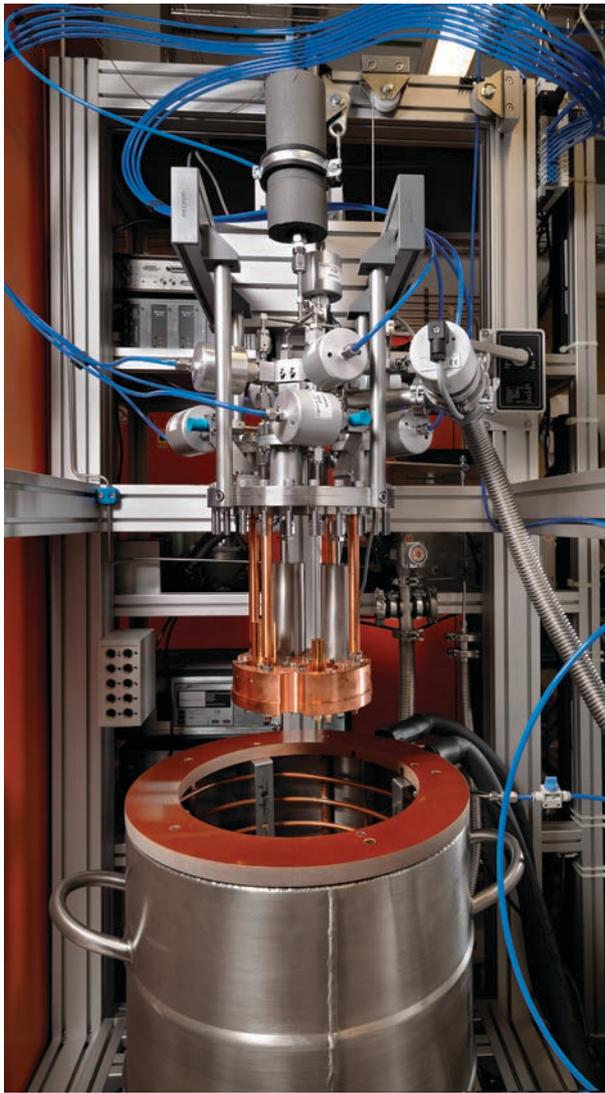
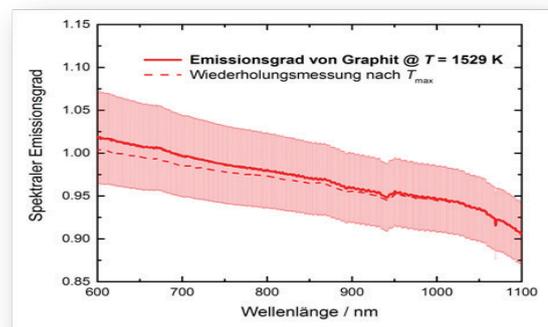
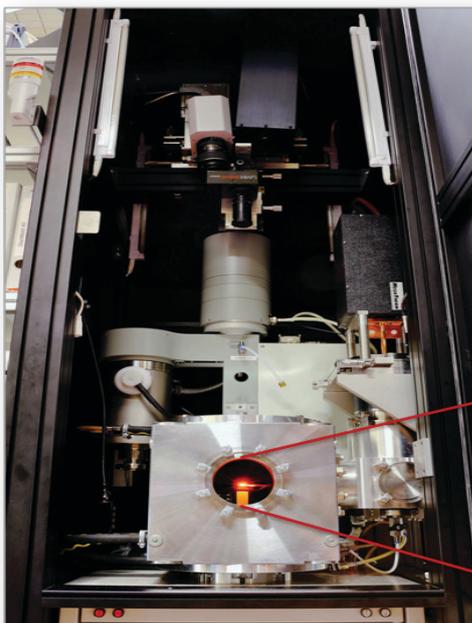


Bild 10: Zylinderkondensatoren in der geöffneten Gas-Expansionsapparatur zur Untersuchung thermophysikalischer Eigenschaften von Wasserstoff-Methan-Mischungen

wie in der Erdfernerkundung und Raumfahrt eine wichtige Größe. Die PTB hat ihren einzigartigen Hochtemperatur-Emissionsgradmessplatz deutlich erweitert, in dem Proben jetzt auch induktiv beheizt werden können und spektral aufgelöste Emissionsgradmessungen mit einer Si-Arrayspektrometer erfolgen (Bild 11).

Bild 11: Links: der Hochtemperatur-Emissionsgradmessplatz. Rechts unten: eine induktiv erhitzte Graphitprobe (Ausschnitt aus dem Induktionsofen), rechts oben: Der spektrale Emissionsgrad von Graphit bei 1529 K



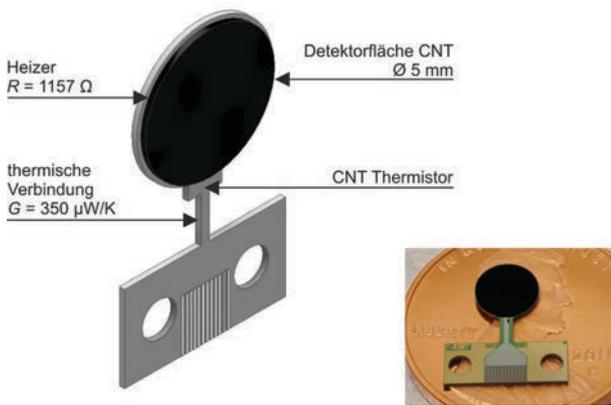


Bild 12: Detektorchip für den IR- bis THz-Spektralbereich. Die Kohlenstoff-Nanoröhrchen wurden auf der runden Detektorfläche vertikal ausgerichtet aufgewachsen.

## Radiometrie

Kohlenstoff-Nanoröhrchen haben das technische Potenzial, stark strahlungsabsorbierende Oberflächen über einen sehr weiten Spektralbereich zu bilden. Gefördert durch ein dreijähriges Humboldt-Stipendium, hat ein Stipendiat vom NIST mit der PTB einen neuartigen thermischen Empfänger mit vertikal ausgerichteten Kohlenstoff-Nanoröhrchen als sehr schwarzen Absorber für IR- und THz-Strahlung entwickelt und mit dem THz-Laser der PTB radiometrisch charakterisiert (Bild 12).

Im Rahmen sich entwickelnder Anwendungen von THz-Strahlung ist die genaue Messung der Strahlungsleistung von zuneh-

mender Bedeutung. In einem durch das zentrale Innovationsprogramm Mittelstand (ZIM) des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie geförderten Kooperationsprojekt „Hochempfindliche Detektoren für den THz- und Mikrowellenbereich“ wurden mit einem deutschen Detektorhersteller großflächige und genau kalibrierbare THz-Detektoren entwickelt, die nun, von der PTB kalibriert, bereits weltweit in vielen Forschungsinstituten für genaue THz-Leistungsmessungen eingesetzt werden (Bild 13).

## Thermische Energie

Das laseroptische Normal zur Rückführung von Hochtemperatur-Durchfluss-Messungen (Bild 14) wurde weiterentwickelt und einer detaillierten Unsicherheitsanalyse, Validierung und Optimierung unterzogen. Im Rahmen der Unsicherheitsquantifizierung wurden unter anderem die Effekte der Diskretisierung des Strömungsfeldes, der Einfluss möglicher Fehlstellen im Messgitter, der Wand- und Gradienteneffekt sowie die Unsicherheit der Strahlverfolgungsrechnung berücksichtigt. Es ergibt sich, je nach erreichter Datenrate und Strömungsfeld, eine erweiterte Messunsicherheit unter 0,2 % ( $k = 2$ ) für die Bestimmung des Volumenstromes, ein weltweit einmalig niedriger Wert für diesen Anwendungsbereich. Im Gegensatz zu einer konventionellen Rückführung mittels volumetrischer oder gravimetrischer Methoden muss der Durchfluss für eine laseroptische Messung weder unterbrochen noch umgelenkt werden.

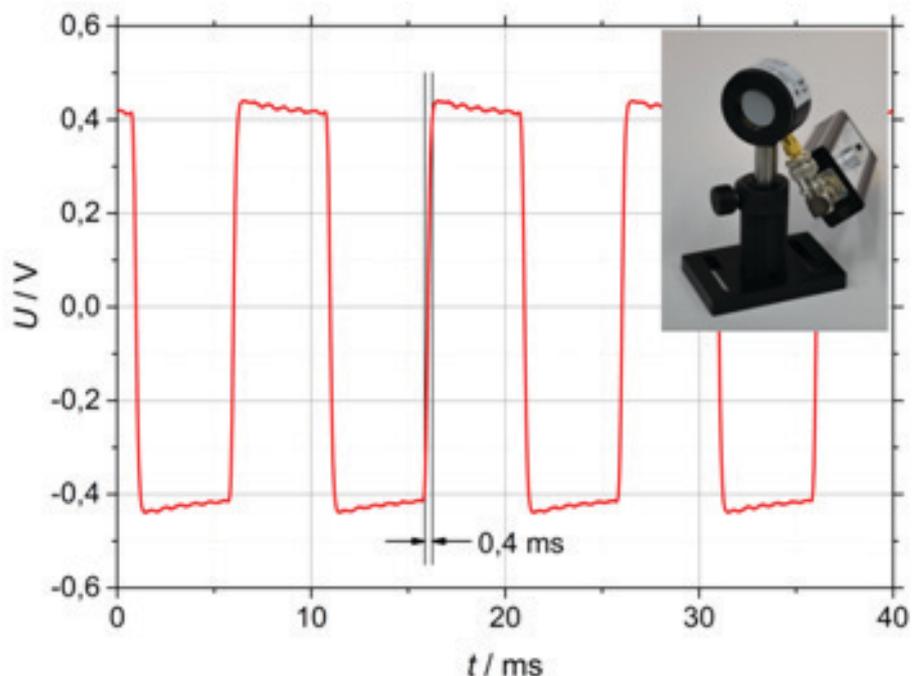


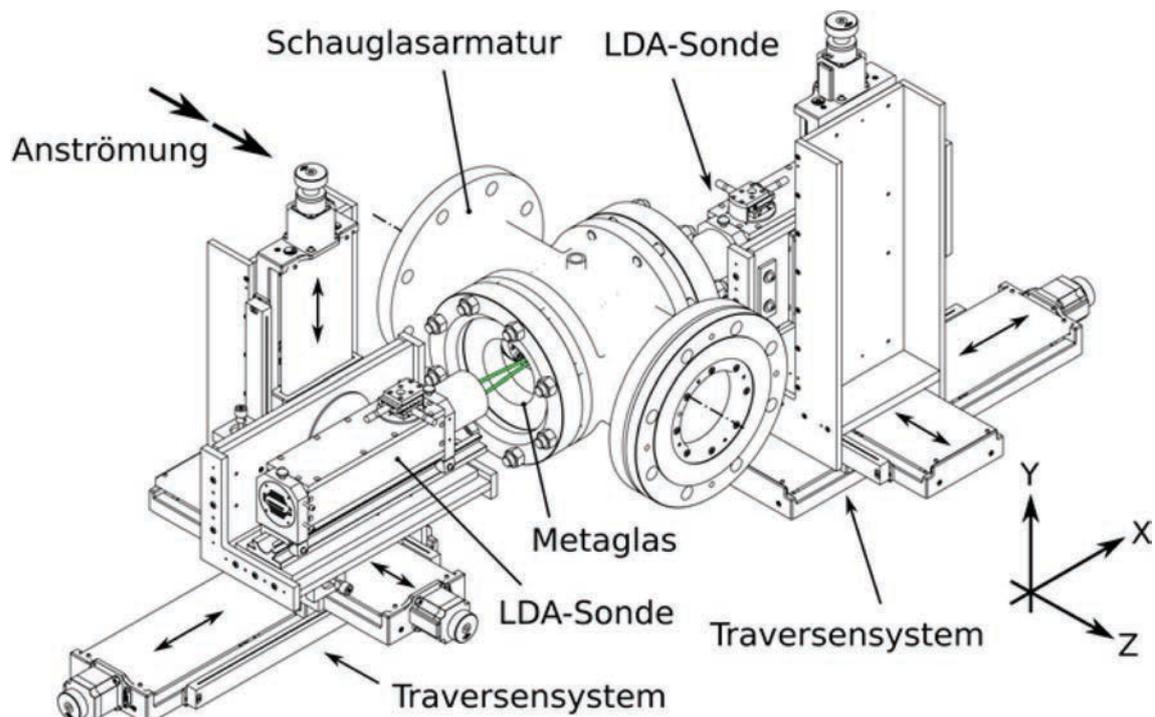
Bild 13: Zeitverhalten eines hochempfindlichen THz-Detektors mit 20 mm Apertur (Foto). Die Messung wurde bei einer Laserfrequenz von 692 GHz (433  $\mu\text{m}$  Wellenlänge) und einer Modulationsfrequenz von 100 Hz bestimmt. Die Anstiegszeit von 0,4 ms wird durch die 1,5 kHz Bandbreitenbegrenzung des angeschlossenen Strom-Spannungs-Wandlers bestimmt.

Begleitend zur messtechnischen Validierung des Normals an der Wärmezählerprüfstrecke wurden numerische Strömungssimulationen durchgeführt, um den Einfluss asymmetrischer Einlaufströmungen auf die Messung des Volumenstroms zu quantifizieren. Es konnte im Rahmen einer Polynom-Chaos-Analyse der Einfluss einer asymmetrischen Anströmung auf die Unsicherheit der Laser-Doppler-Anemometrie(LDA)-Durchflussmessung quantifiziert werden. Bei Wahl eines geeigneten Messgitters konnte gezeigt werden, dass das laser-optische Normal auch außerhalb des Prüfstands-betriebs eingesetzt werden kann, um Durchflussmesser mit geringen Messunsicherheiten zu kalibrieren.

Die durchgeführten Arbeiten am laseroptischen Normal haben bisher zu zwei Patentanmeldungen im Bereich der LDA-Anwendungen und einer Patentanmeldung im Bereich der Konstruktion hydraulischer Armaturen geführt.

Am 21. November 2006 wurde die erste Baumusterprüfbescheinigung für einen Wärmezähler auf der Grundlage der Europäischen Messgeräte-Richtlinie (MID) durch die Benannte Stelle PTB ausgestellt. Nach 10 Jahren besteht bei Wärmezählern ungebrochen ein hohes Vertrauensniveau in die Arbeit der Benannten Stelle PTB. Ihre ausgestellten Dokumente besitzen für den ersten Marktauftritt eine hohe wirtschaftliche Bedeutung. Mit jährlich 90 Erstaussgaben und Revisionen für Wärmezähler, deren Teilgeräte und Kombinationen, wird damit nahtlos an Zulassungszahlen vor Einsetzung der MID angeknüpft. Kältezähler, ihre Teilgeräte und Kombinationen werden auch derzeit nach innerstaatlichem Recht konformitätsuntersucht, ein Umstand mit gutem Potenzial zum Abbau europäischer Handelshemmnisse. Der Fachbereich 7.5 *Wärme und Vakuum* strebt deshalb gemeinsam mit Industrieverbänden, WELMEC, CEN und DIN eine entsprechende Erweiterung des messgerätespezifischen MID-Anhangs unter Einschluss dieser Bauarten an. Von unseren Partnern wird den Aktivitäten zur harmonisierten Fachgrundnorm EN 1434 und zum normativen OIML-Dokument R 75 großer Respekt gezollt. Dabei fließen maßgeblich Technische Richtlinien der PTB für Wärme- und Kältezähler ein.

Bild 14: Schematische Ansicht des laseroptischen Normals



# In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

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

## Grundlagen der Metrologie

### Radiometrische Charakterisierung einer „Laser-Driven Light Source“

Laser-Driven Light Sources (LDLS) finden mehr und mehr Verbreitung als intensive Breitbandquellen, deren spektrale Strahlstärke die von Deuteriumlampen um einige Größenordnungen übertrifft. Sie basieren auf einer Xenon-Plasmaentladung, die von einem IR-Laser getrieben wird. Eine solche Quelle wurde nun rückführbar auf das primäre Strahlernormal BESSY II im Spektralbereich von 170 nm bis 400 nm radiometrisch charakterisiert und ihre Eignung als TransfERNormal untersucht. (R. Thornagel, FB 7.1, [reiner.thornagel@ptb.de](mailto:reiner.thornagel@ptb.de))

### VDI/VDE-Richtlinie „Röntgenoptische Systeme“ vollständig erschienen

Die VDI/VDE-Richtlinie 5575 ist nun mit insgesamt 10 Blättern vollständig erschienen. Neben dem federführend in der PTB entstandenen Blatt 1 zu Grundlagen und Begriffen behandelt Blatt 2 allgemeine Messverfahren, während sich die nachfolgenden Blätter jeweils mit einzelnen Röntgenoptiken wie Spiegeln, Gittern, Monochromatorkristallen, Kapillaren, Transmissions- und Reflexionszonenplatten, refraktiven Linsen und Filtern befassen. (M. Krumrey, FB 7.1, [michael.krumrey@ptb.de](mailto:michael.krumrey@ptb.de))

### An der Oberfläche des neuen Kilogramms

Auf den hochreinen Silizium-Kugeln für die Neudefinition der Einheit Kilogramm haben Oberflächeneffekte wie die sich ausbildenden Oxid- und Kontaminationsschichten einen Einfluss auf die Masse und das Volumen und damit auf die Dichte der Kugel. Um die Oberfläche mit kleinsten Unsicherheiten charakterisieren zu können, wurde an der *Metrology Light Source* eine Anlage zur kombinierten Röntgenfluoreszenz- und Photoelektronenspektroskopie aufgebaut und in Betrieb genommen. (M. Kolbe, FB 7.1, [michael.kolbe@ptb.de](mailto:michael.kolbe@ptb.de))

### Wirkungsquerschnitte für Photoionisation im VUV-Spektralbereich

In Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik in Freiburg wurde zur Bestimmung atomarer Photoionisationsquerschnitte an der *Metrology Light Source* eine Doppelionisationskammer mit Synchrotronstrahlung eingesetzt. Der Schwerpunkt der Messungen lag auf

der Rückführbarkeit, um verlässliche Daten für die Gasanalytik zu generieren. (A. Gottwald, FB 7.1, [alexander.gottwald@ptb.de](mailto:alexander.gottwald@ptb.de))

### Abschluss des EMRP-Projektes Q-AIMDS

Im Jahr 2016 wurde das EMRP-Projekt „Chemical metrology tools for manufacture of advanced biomaterials in the medical device industry“ (Q-AIMDS) erfolgreich abgeschlossen. Ziel war es, mittels FTIR- und Röntgenspektrometrie Beschichtungen funktionelle Oberflächen und Kontaminationen sowie Defektstrukturen von passiven Medizinprodukten im Herstellungsprozess zu identifizieren und zu analysieren. Außerdem wurde Röntgen- und FTIR-Spektrometrie mit Raman-Spektroskopie, SIMS und XPS kombiniert, um Referenzmessverfahren und Standards für den Einsatz in der Herstellung zu qualifizieren. (B. Pollakowski, FB 7.2, [beatrix.pollakowski@ptb.de](mailto:beatrix.pollakowski@ptb.de))

### Untersuchung der Medikamentenaufnahme von Biofilmen mittels Synchrotronstrahlung

Bei dem in diesem Jahr gestarteten EMPIR-Projekt „Quantitative measurement and imaging of drug-uptake by bacteria with antimicrobial resistance“ ist die PTB mit der Untersuchung von Biofilmen und Bakterien mittels Synchrotronstrahlung beteiligt. Mithilfe von Terahertz-, Infrarot- und Röntgenstrahlung soll die Aufnahme von antibakteriellen Stoffen in Biofilmen und Bakterien untersucht werden. Ziel dieses Projektes ist es, quantitative Methoden zu entwickeln, die orts aufgelöste Informationen ermöglichen, um die Resistenzmechanismen von Biofilmen besser zu verstehen. (C. Streeck, FB 7.2, [cornelia.streeck@ptb.de](mailto:cornelia.streeck@ptb.de))

### Effiziente Biodiagnostik mittels SEIRA-Methodik und Synchrotronstrahlung

Es wurde ein effizientes Biodiagnostik-Verfahren entwickelt, das die oberflächenverstärkte Infrarotabsorption (SEIRA) mittels Au-Nanoteilchen ausnutzt. Gleichzeitig erlaubt die hohe Brillanz der IR-Synchrotronstrahlung des Speicherrings *Metrology Light Source* in Kombination mit einem Detektor-Array eine effiziente simultane Aufzeichnung von über 1000 Spektren, die automatisiert statistisch ausgewertet werden können. (A. Hornemann, FB 7.2, [andrea.hornemann@ptb.de](mailto:andrea.hornemann@ptb.de))

### **Erste Beobachtung von Plasmonsignaturen in zweilagigen MoS<sub>2</sub>-Schichten**

Die Untersuchung von Transportphänomenen in 2D-elektronischen Materialien, wie MoS<sub>2</sub>, erfordert üblicherweise deren Kontaktierung mittels Nanolithografie. Dies verursacht jedoch Verunreinigungen und beeinflusst die Transporteigenschaften. Mittels Nano-FTIR können diese Untersuchungen kontaktlos vorgenommen werden, was an der *Metrology Light Source* in Zusammenarbeit mit der FU Berlin erstmalig an MoS<sub>2</sub>-Schichten demonstriert werden konnte. Dabei wurde in zweilagigen MoS<sub>2</sub>-Schichten eine Kopplung von Plasmonmoden mit Oberflächenphononen des SiO<sub>2</sub>-Substrates beobachtet. (B. Kästner, FB 7.2, bernd.kaestner@ptb.de)

### **EMRP-Projekt „New Standards and Traceability for Radiometry – NEWSTAR“ erfolgreich abgeschlossen**

Ziel des europäischen Forschungsprojekts war, die Berechenbarkeit der spektralen Empfindlichkeit von speziell zu diesem Zweck hergestellten Silizium-Photodioden – sogenannten Predictable Quantum Efficient Detectors (PQEDs) – zu verbessern sowie die Anwendbarkeit dieser Detektoren in der Radiometrie und Photometrie zu demonstrieren. Die hochpräzisen radiometrischen Charakterisierungsmessungen an den PQEDs, die in der PTB erfolgten, führten dazu, dass die Berechnung der spektralen Empfindlichkeit dieser Detektoren mithilfe von dreidimensionalen Softwaremodellen deutlich verbessert werden konnte. Als wesentlicher Simulationsparameter der Photodioden wurde die Oberflächenrekombinationsrate erkannt. Diese detektorspezifische Größe kann an geeigneten Proben bestimmt werden. Damit ist eine weitere notwendige Bedingung für die Verwendung von PQEDs als Detektorprimärnormal erfüllt worden. (L. Werner, FB 7.3, lutz.werner@ptb.de)

### **Hochgenauer Vergleich von Strahlungsdetektoren**

Unsicherheiten von unter 10 ppm wurden bei dem Vergleich von Detektoreigenschaften an einem neuentwickelten Messplatz für die radiometrische Charakterisierung von Halbleiterdetektoren erreicht. Es können Detektoren hinsichtlich ihrer relativen spektralen Empfindlichkeit und auch bezüglich der Linearität und Ortsabhängigkeit ihrer relativen spektralen Empfindlichkeit extrem genau verglichen werden. Die Detektoren können an Luft, unter Vakuum oder Schutzgasatmosphäre sowie bei Temperaturen bis hinunter zu -196 °C betrieben werden. Die hier gewonnenen Ergebnisse sind besonders geeignet, die Vorhersage von berechneten

Detektoreigenschaften durch den Vergleich zwischen Detektoren, die sich nur in einem Parameter unterscheiden, zu überprüfen. (I. Müller, FB 7.3, ingmar.mueller@ptb.de)

### **Humboldt-Stipendiat entwickelt neuartigen IR- und THz-Detektor**

Gefördert durch ein dreijähriges Humboldt-Stipendium hat ein Stipendiat vom NIST mit der PTB einen neuartigen thermischen Empfänger mit ausgerichteten Kohlenstoff-Nanoröhrchen als sehr schwarzen Absorber für IR- und THz-Strahlung entwickelt und mit dem THz-Laser der PTB radiometrisch charakterisiert. (J. Hollandt, FB 7.3, joerg.hollandt@ptb.de)

### **Bestimmung der Boltzmann-Konstante an der PTB mit einer Unsicherheit von 1,9 ppm**

Abschließende Messungen mit dem Dielektrizitätskonstanten-Gasthermometer (DCGT) haben einen Wert für die Boltzmann-Konstante  $k$  mit einer relativen Messunsicherheit von 1,9 Millionstel (1,9 ppm) ergeben. Dieser letzte Schritt konnte nur durch Verbesserung der verwendeten Kondensatoren und insbesondere durch die hochgenaue Messung ihrer elastischen Eigenschaften erreicht werden. Das DCGT ist nach der akustischen Gasthermometrie die Methode mit der geringsten Unsicherheit für die Bestimmung von  $k$ . Damit ist auch die Bedingung des Konsultativkomitees für Thermometrie (CCT) erfüllt,  $k$  unter Anwendung von zwei fundamental unterschiedlichen Methoden mit Messunsicherheiten jeweils unter 3 ppm zu bestimmen. Einer Neudefinition der Basiseinheit Kelvin über die Festlegung der Boltzmann-Konstante steht nichts mehr entgegen. (C. Gaiser, FB 7.4, christof.gaiser@ptb.de)

### **Präzisionsensor für Absolutmessungen von Schallgeschwindigkeiten**

Ein neuartiges Sensorkonzept ermöglicht absolute Schallgeschwindigkeitsmessungen auf Basis der Flugzeitmethode mit bisher unerreicht geringen Messunsicherheiten. Der Sensor besitzt als Besonderheit zwei Reflexionsebenen, wodurch für jeden ausgesandten Puls zwei Echos entstehen. Durch die so ermöglichte Differenzmessung zwischen den beiden Echos sind die Modelle für Korrekturen einfach. Zahlreiche Messungen im Temperaturbereich von 0 °C bis 80 °C bei Drücken bis zu 60 MPa in korrosiven und elektrisch leitfähigen Flüssigkeiten haben die Qualität und die Vorzüge des Sensors bestätigt. Für Reinstwasser konnten so neue Referenzdaten gewonnen werden. (F. Fehres, FB 7.4, felix.fehres@ptb.de)

### **Einfluss von Verunreinigungen auf die Temperatur des Zink-Fixpunkts bei 419,5 °C**

Der Einfluss von Verunreinigungen mit typischen Konzentrationen von einigen 10 ppb ( $10^{-8}$ ) ist für viele Temperaturfixpunkte der dominierende Messunsicherheitsbeitrag. Aufbauend auf rückgeführten chemischen Analysen mittels Glimmentladungs-Massenspektrometrie durch Partnerinstitute (BAM, NRC), wurden in der PTB Dotierexperimente für alle relevanten Verunreinigungsspezies durchgeführt. Im Ergebnis konnte eine zehnfache Verbesserung des diesbezüglichen Unsicherheitsbeitrags (jetzt  $< 50 \mu\text{K}$ ) für den Zink-Fixpunkt erreicht werden. (S. Rudtsch, FB 7.4, steffen.rudtsch@ptb.de)

### **Neubestimmung thermodynamischer Temperaturen zwischen 20 mK und 700 mK**

Zur Umsetzung der „Mise en Pratique“ für das Kelvin nach der erwarteten Neudefinition der Temperatureinheit im Jahr 2018 wurden im Rahmen des EMRP-Projekts „Implementing the new kelvin – InK“ thermodynamische Temperaturen im Tieftemperaturbereich neu bestimmt. Dies erfolgte im Vergleich von drei verschiedenartigen und neu entwickelten Primärthermometern an der PTB und am VTT-MIKES in Kooperation mit der Aalto Universität Helsinki und der Royal Holloway University London. Die Messungen bestätigen die thermodynamische Korrektheit der PLTS-2000 im genannten Temperaturbereich mit einer Messunsicherheit von nicht mehr als 0,5 %. Im gerade begonnenen EMPIR-Nachfolgeprojekt InK-2 soll jetzt der Temperaturbereich der Messungen mit den weiter verbesserten Primärthermometern bis hinunter zu 1 mK ausgedehnt werden. (J. Engert, FB 7.4, jost.engert@ptb.de)

### **Metrologie für die Wirtschaft**

#### **Fortsetzung der Zusammenarbeit mit der Carl Zeiss SMT GmbH**

Die seit 1998 bestehende Kooperation mit der Firma Carl Zeiss SMT GmbH auf dem Gebiet der EUV-Radiometrie wurde in einem 8. Nachtrag bis Ende 2020 verlängert. Sie bildet die Grundlage einer wichtigen Dienstleistung der PTB für die deutsche und europäische Halbleiter-Industrie bei der Entwicklung der EUV-Lithografie. Neben der EUV-Reflektometrie und -Detektorradiometrie beziehen sich die messtechnischen Weiterentwicklungen insbesondere auf die EUV-Scatterometrie in einem inzwischen deutlich größeren Kreis von Kooperationspartnern. (F. Scholze, FB 7.1, frank.scholze@ptb.de)

### **Untersuchung alternativer Membranen als Pelli- kel für die EUV-Lithografie**

Im Rahmen des Projektes „Seven Nanometre Technology“ (SeNaTe) unter dem EU-Programm Horizont 2020 im ECSEL-Call 2014-2 „Innovation Actions“ wurden mit EUV-Strahlung Membranen untersucht, die als Alternative zu Silizium-Membranen als Pelli-  
kel (Schutzfilm) für Photomasken in der EUV-Lithografie eingesetzt werden sollen. Ziel ist es, Membranen mit sehr hoher Transmission für die EUV-Strahlung zu finden, die gleichzeitig in der harten Umgebung einer EUV-Belichtungsmaschine eine große Lebensdauer haben. (F. Scholze, FB 7.1, frank.scholze@ptb.de)

### **Neuartige verspannte Germanium-Zinn-Legierungsschichten auf GaAs-Oberflächen**

In Zusammenarbeit mit dem Halbleiterforschungsinstitut IMEC aus Belgien wurden röntgenspektrometrische Untersuchungen zu neuartigen Oberflächenpassivierungsverfahren für GaAs-Oberflächen durchgeführt. Mithilfe von sich selbst organisierenden Molekülen im Herstellungsverfahren entstehen nanoskalige, thermisch stabile, verspannte Germanium-Zinn-Legierungsschichten. (P. Hönick, FB 7.2, philipp.hoenicke@ptb.de)

### **Technologietransfer eines hochempfindlichen Messverstärkers**

Der Technologietransfer des Ultrastable Low-Noise Current Amplifier (ULCA) zur Firma Magnicon wurde erfolgreich abgeschlossen. Zunächst wird die erste Gerätegeneration vermarktet, die in den Jahren 2012 bis 2015 in enger Zusammenarbeit mit der Abteilung 2 der PTB zur Marktreife entwickelt wurde. Es liegen bereits fünf Bestellungen vor. Die Entwicklung einer zweiten, weiter verbesserten Gerätegeneration wird voraussichtlich bis Ende des Jahres 2016 abgeschlossen sein. Nach einer ca. einjährigen Erprobungsphase im Praxistest in der PTB sowie im Rahmen des EMPIR-Projektes e-SI-Amp ist deren Markteinführung für Ende 2017 geplant. (D. Drung, FB 7.2, dietmar.drung@ptb.de)

### **Ammoniak-Wärmerohr-Flächenstrahler für bildgebende IR-Messsysteme**

Ein neuartiger Ammoniak-Wärmerohr-Flächenstrahler wurde in Zusammenarbeit mit dem Institut für Kernenergetik (IKE) der Universität Stuttgart konzipiert und am IKE gefertigt. Mit einem Durchmesser von 260 mm ist dieser auch im Vakuum anwendbare Flächenstrahler eine sehr isotherme, großflächige Strahlungsquelle für Strahlungstemperaturen von  $-60 \text{ °C}$  bis  $50 \text{ °C}$  in einem Spektralbereich von  $1 \mu\text{m}$  bis  $50 \mu\text{m}$ . Bei der Anwendung

des Ammoniak-Wärmerohr-Flächenstrahlers als Kalibrierstrahler insbesondere für bildgebende Infrarotdetektor-Systeme werden Messunsicherheiten von weniger als 100 mK erreicht. (B. Gutschwager, FB 7.3, berndt.gutschwager@ptb.de)

### **Entwicklung und Spezifizierung eines cosinusgetreuen Messkopfes für Infrarot-Wärmestrahlung**

Im Rahmen einer Kooperation mit der Bundesvereinigung der Firmen im Gas- und Wasserfach e. V. wurden für die vorgesehene Neufassung der europäischen Normen DIN EN 416-2 und DIN EN 419-2 die darin enthaltenen Spezifikationen für einen breitbandigen Infrarot-Detektormesskopf zur Messung der Wärmestrahlung von großflächigen Infrarot-Heizstrahlern grundlegend überprüft und überarbeitet. Der aus einem thermischen Detektor und einer goldbeschichteten Ulbrichtkugel bestehende Messkopf wurde durch die auf radiometrische Messungen an Prototypen gestützte, systematische Anpassung der technischen Spezifikationen zur Oberflächenstrukturierung und Beschichtung der Ulbrichtkugel so optimiert, dass seine herstellerunabhängige Fertigung mit einem reproduzierbaren und cosinusgetreuen Ansprechverhalten deutlich verbessert wurde. (R. D. Taubert, FB 7.3, dieter.taubert@ptb.de)

### **Hochtemperatur-Emissionsgradmessplatz weiterentwickelt**

Der weltweit einzigartige Hochtemperatur-Emissionsgradmessplatz der PTB wurde durch ein induktives Heizkonzept mit dem Ziel erweitert, die Unsicherheitsbeiträge zu reduzieren, die aus der heißen Probenumgebung eines konventionellen Rohrofens resultieren. Darüber hinaus wurde eine spektral aufgelöste Emissionsgradmessung im Bereich von 500 nm bis 1100 nm durch ein charakterisiertes Array-Spektrometer ermöglicht. Erste Messungen an isostatisch gepresstem Graphit zeigen sehr gute Ergebnisse. (D. Urban, FB 7.3, david.urban@ptb.de)

### **THz-Detektoren erfolgreich entwickelt und weltweit vermarktet**

In einem durch das zentrale Innovationsprogramm Mittelstand (ZIM) des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie geförderten Kooperationsprojekt „Hochempfindliche Detektoren für den THz- und Mikrowellenbereich“ wurden mit einem deutschen Detektorhersteller großflächige und genau kalibrierbare THz-Detektoren entwickelt, die nun, von der PTB kalibriert, bereits weltweit in vielen Forschungsinstituten für genaue THz-Leistungsmessungen eingesetzt werden. (A. Steiger, FB 7.3, andreas.steiger@ptb.de)

### **Wichtige Schwarzlacke hochgenau vermessen**

Der spektrale Emissionsgrad von sehr schwarzen Oberflächen ist eine wichtige technische Größe, wenn die genaue Bestimmung von Strahlungstemperaturen oder auch des Energietransports über Strahlung erfolgen soll. An der PTB wurden die spektralen Emissionsgrade von technisch relevanten Schwarzlacken für die Strahlungsthermometrie und die Erdfernerkundung sehr genau bestimmt und die Ergebnisse veröffentlicht. (A. Adibekyan, FB 7.3, albert.adibekyan@ptb.de)

### **Verbesserte Kalibriermöglichkeiten für Thermoelemente am Palladium-Schmelzpunkt bei 1553 °C**

Im Rahmen einer Zusammenarbeit mit dem South China National Centre of Metrology wurden in der PTB 15 Miniaturtiegel aus drei verschiedenen keramischen Materialien sowie zwei verschiedenen Designs mit hochreinem Palladium als Fixpunktmaterial gefüllt und metrologisch untersucht. Die erzielten Ergebnisse zeigten eine Übereinstimmung der Schmelztemperaturen aller Fixpunkte innerhalb eines Temperaturintervalls von  $\pm 0,25$  K. Gleichzeitig konnte die Lebensdauer der Miniaturfixpunktzellen auf Basis des neuartigen Designs, der optimierten Füllprozedur und der Festlegung validierter Prozessparameter gegenüber den bisher verwendeten Miniaturfixpunktzellen erheblich um den Faktor 5 verlängert werden. (F. Edler, FB 7.4, frank.edler@ptb.de)

### **Nicht-konventionelle Pt/Rh-Legierungen für den Hochtemperaturbereich**

Konventionelle Pt/Rh-legierte Thermoelemente der Typen S, R und B werden seit Jahrzehnten zur Messung von Temperaturen oberhalb von 1000 °C verwendet, obwohl durch die selektive Oxidation von Rhodium thermoelektrische Instabilitäten auftreten. Ihre Legierungen wurden eher intuitiv auf der Basis verfügbarer Materialien gewählt und sind nicht das Resultat einer Optimierung ihrer thermoelektrischen Eigenschaften. Dieses Ziel hat sich das EMPIR-Projekt „Enhancing process efficiency through improved temperature measurement“ gesetzt. Die PTB und das NPL führen Alterungsuntersuchungen (> 6000 h) an verschiedenen nicht-konventionellen Pt/Rh-Legierungen durch, um driftarme Thermoelementkombinationen für Temperaturen um 1500 °C zu entwickeln. Unterstützt werden diese Anstrengungen durch das neuseeländische Metrologie-Institut MSL, an dem Studien zur thermoelektrischen Homogenität dieser Pt/Rh-Legierungen durchgeführt werden. Erste Ergebnisse zeigen, dass Kombinationen von Legierungen exi-

stieren, die eine nahezu driftfreie Temperaturmessung erlauben. (F. Edler, FB 7.4, frank.edler@ptb.de)

### **DKD-Fachbegutachterworkshop für Temperaturmessgrößen**

Derzeit sind 94 Kalibrierlaboratorien für Temperaturmessgrößen akkreditiert. Während der vergangenen Jahre hat sich gezeigt, dass aufgrund der zunehmenden Variabilität bezüglich Kalibrierverfahren und -gegenständen eine enge Abstimmung der Fachbegutachter erforderlich ist, um die Einheitlichkeit bei Akkreditierungsvorgängen sicherzustellen. Daher wurde in Kooperation zwischen PTB/DKD und der DAkkS im Oktober 2015 ein zweitägiger Workshop für Fachbegutachter für Temperaturmessgrößen durchgeführt. Aufgrund der sehr positiven Rückmeldungen und des nach wie vor hohen Fortbildungs- und Abstimmungsbedarfs wird zukünftig jährlich ein solcher Workshop in Berlin stattfinden. (S. Rudtsch, FB 7.4, steffen.rudtsch@ptb.de)

### **Bestimmung thermophysikalischer Eigenschaften von Gasen für die Energiewende**

Das an der PTB perfektionierte Dielektrizitätskonstanten-Gasthermometer (DCGT) wird in einer erweiterten Variante zur Anwendung gebracht. Ziel ist es, mit einer Kombination von DCGT und Expansionstechniken Messungen von Realgaseigenschaften durchzuführen. Neben den klassischen können damit auch die dielektrischen Wechselwirkungen bestimmt werden. Die Apparatur wird zunächst an Edelgasen erprobt, um im Anschluss daran Gasgemische zu untersuchen. Im Fokus stehen dabei Wasserstoff-Methan-Mischungen, die im Zuge der Energiewende beim Einspeisen von regenerativ erzeugtem Wasserstoff ins Erdgasnetz entstehen. Die bestimmten Stoffdaten sind vor allem für eine genaue Abrechnung, aber auch für die fundierte Aufstellung von Zustandsgleichungen notwendig. (C. Günz, FB 7.4, christian.guenz@ptb.de)

### **Patentmeldungen für das laseroptische Normal**

Die durchgeführten Arbeiten am laseroptischen Normal haben zu drei Patentmeldungen geführt. Zwei Anmeldungen sind der Anwendung der Laser-Doppler-Anemometrie (LDA) zuzuordnen. Eine neuartige Methode zur Rekonstruktion des Messvolumens an einem Target ermöglicht es, die Kalibrierkonstante des LDA-Messvolumens direkt am Ort der Anwendung zu überprüfen, ohne auf ein externes Geschwindigkeitsnormal angewiesen zu sein. Ein weiteres Verfahren, basierend auf der Auswertung des Strahlverlaufs nach Durchgang durch

den optischen Zugang, ermöglicht es, Geometrie und optische Eigenschaften des optischen Zugangs messtechnisch zu erfassen und damit die relative Position des Messvolumens mit kleiner Unsicherheit festzulegen. Eine weitere Anmeldung ist auf dem Gebiet der Konstruktion hydraulischer Armaturen erfolgt. Es wurden konstruktive Maßnahmen zur passiven Selbstentlüftung von strömungstechnischen (Schauglas-) Armaturen im Betrieb entwickelt und in einem Prototyp realisiert. (M. Juling, FB 7.5, markus.juling@ptb.de)

### **Optimierung von hybriden CFD-Methoden für die numerische Simulation komplexer Rohrströmungen**

In zahlreichen Vergleichen zwischen CFD-Simulationen und laser-optischen Experimenten wurde festgestellt, dass die heute dem Industrie-Standard entsprechenden RANS-Turbulenzmodelle bei Strömungen mit starker Ablösung oder großen Sekundärkomponenten schlechte Ergebnisse erzielen. Aus diesem Grund werden zurzeit hybride Simulationsmethoden, bestehend sowohl aus RANS als auch aus skalen-auflösenden Grobstrukturmodellen, untersucht und für Rohrströmungsprobleme optimiert. Damit konnten bisher gute Ergebnisse bei Störkörper-Simulationen erreicht werden. (M. Straka, FB 7.5, martin.straka@ptb.de)

### **Gekoppeltes numerisches und laseroptisches Messverfahren zur Vor-Ort-Kalibrierung von Wärmehählern**

Das Verfahren ermöglicht es, die Strömungsgeschwindigkeit in einer Rohrleitung entlang eines diametralen Pfades im laufenden Betrieb zu messen und daraus unter Annahme einer Rotations-symmetrie den Volumenstrom zu bestimmen. Bei asymmetrischer Anströmung ist die Bestimmung des Durchflusses auf Basis eines Pfades fehlerbehaftet. Zur Abschätzung und Verringerung dieser Fehler sowie zur Ausweitung des Einsatzgebietes wurde das Verfahren durch numerische Strömungssimulationen erweitert. Die kombinierte Methode wurde anhand von Messdaten hinter verschiedenen gekrümmten Rohrgeometrien am Prüfstand erfolgreich angewendet und validiert. (A. Weissenbrunner, FB 7.5, andreas.weissenbrunner@ptb.de)

### **Volumetrischer Prüfstand für Glykol-Wassergemische**

Im Rahmen eines Gemeinschaftsprojekts der PTB mit dem VDDW (Verband der deutschen Wasser- und Wärmezählerindustrie e. V.) und der ARGE Heiwako (Arbeitsgemeinschaft Heiz- und Wasserkostenverteilung e. V.) werden Durchflusssensoren

für Anwendungen wie die Solarthermie und die Kältetechnik messtechnisch überprüft. Die Sensoren zeigen allesamt Abweichungen außerhalb üblicher Verkehrsfehlergrenzen für Wasser, welche jedoch sehr gut reproduzierbar sind. Damit bilden sie eine ausgezeichnete Grundlage für medien-spezifische Korrekturen am Sensor. Dies konnte am Beispiel eines Geräts gezeigt werden, welches für einen Dynamikbereich von 1 : 100 und Temperaturen von 20 °C bis 80 °C Abweichungen unterhalb von 2 % aufwies. (S. Baack, FB 7.5, sebastian.baack@ptb.de)

### **Metrologie für die Gesellschaft**

#### **Multilayer-Spiegel für das Wasserfenster**

Multilayer-Spiegel für die Mikroskopie von organischen Substanzen in wässriger Umgebung im Spektralbereich von 2,3 nm bis 4,3 nm weisen oft signifikante Reflexionsverluste auf. Im Rahmen einer Doktorarbeit wurden im PTB-Laboratorium bei BESSY II nun komplementäre Messmethoden mit Synchrotronstrahlung entwickelt, mit denen sich Rauheit und Interdiffusion in den Schichtsystemen der Spiegel als mögliche Verlustursachen eindeutig unterscheiden lassen. (A. Haase, FB 7.1, anton.haase@ptb.de)

#### **Charakterisierung des zeitlichen Ansprechverhaltens eines Röntgendetektors**

Der Neutron Star Interior Composition Explorer (NICER) soll 2017 auf der Internationalen Raumstation eingesetzt werden, um die Rotation von Neutronensternen im Röntgenbereich mit hoher zeitlicher Auflösung zu beobachten. Für die Charakterisierung des zeitlichen Ansprechverhaltens von NICER mit Synchrotronstrahlung wurde im PTB-Laboratorium bei BESSY II nun erstmals die Zeitstruktur des Speicherrings mit der Umlauffrequenz von 1,25 MHz genutzt, um gleichsam einen Pulsar zu simulieren. (M. Krumrey, FB 7.1, michael.krumrey@ptb.de)

#### **Untersuchung der chemischen Bindung von Chlorophyll in Flüssigkeit**

In Zusammenarbeit mit der Technischen Universität Berlin konnte erstmalig das Magnesium-Zentralatom von Chlorophyll a mit NEXAFS in flüssiger Umgebung untersucht werden. Passend zu den Experimenten konnten mithilfe theoretischer Simulationen die an den beobachteten Übergängen beteiligten Molekülorbitale der Bindung des Magnesiumzentralatoms zum organischen Ringmolekül bestimmt werden. (C. Streeck, FB 7.2, cornelia.streeck@ptb.de)

#### **Erster Meilenstein in der End-to-End-Kalibrierung des NDMC erreicht**

Das Network for the Detection of Mesospheric Change (NDMC) beobachtet langfristige Temperaturentrends in der oberen Atmosphäre. Das von der PTB in Zusammenarbeit mit dem DLR entwickelte Kalibrierkonzept soll dem NDMC den Nachweis von Temperaturentrends von 1 K/Dekade ermöglichen. Ein wichtiger Teil dieses Konzepts, das Near Infrared Radiation Transfer Radiometer (NIRTR), wurde gemeinsam vom Niederländischen Metrologie-Institut (VSL) und der PTB entwickelt, gefertigt und kalibriert. Das hochempfindliche Radiometer erfüllt die geforderten Spezifikationen in Bezug auf das Signal-Rausch-Verhältnis, den Size-of-Source-Effekt und die Langzeitstabilität bei der Messung von Strahldichten kleiner als  $350 \text{ Wm}^{-1}\text{sr}^{-1}\text{m}^{-2}$  bei einer Wellenlänge von  $1,55 \mu\text{m}$ . (M. Reiniger, FB 7.3, max.reiniger@ptb.de)

#### **Verbesserte Rückführung des GLORIA-Spektrometers**

Die im europäischen Forschungsprojekt „Metrology for Earth Observation and Climate 2“ in Zusammenarbeit mit der Universität Wuppertal verbesserten Referenzschwarzkörper für die Rückführung der Hyperspektralkamera GLORIA wurden an der PTB unter stratosphärischen Bedingungen charakterisiert und kalibriert. Die Schwarzkörper zeigen unter Verwendung eines monolithischen, mit Drahterosion gefertigten Pyramidenfeldes, hochgenau kalibrierter Pt100-Sensoren und einer optimierten Elektronik nun eine um den Faktor 10 verbesserte Temperaturhomogenität von 33 mK bei einer Temperatur von  $-30 \text{ °C}$ . (C. Monte, FB 7.3, christian.monte@ptb.de)

#### **Untersuchung der Strömungsprofilabhängigkeit von Haushaltszählern**

Der Strömungszustand in einer geschlossenen Rohrleitung der Dimension DN 15 wurde nach einer Änderung des Rohrdurchmessers (Sprung) anhand von Stereoscopic Particle Image Velocimetry (SPIV) und Computational Fluid Dynamics (CFD) untersucht. So konnten die Änderungen des Strömungsprofils, die ein Haushaltszähler im Einbauzustand erfährt, festgestellt werden. Dabei wurden deutliche Auswirkungen auf die Strömung durch die Änderungen des Rohrdurchmessers nachgewiesen. Hierbei konnten mithilfe der SPIV erstmalig zeitlich und räumlich hoch aufgelöste Messungen in dieser Rohrdimension stattfinden. Mittels der hier gesammelten Erkenntnisse wurden in Folgeuntersuchungen die Messabweichungen realer Zähler

aufgrund dieses Einflusses bestimmt und beurteilt. (T. Eichler, FB 7.5, thomas.eichler@ptb.de)

### Internationale Angelegenheiten

#### Untersuchung der resonanten inelastischen Röntgenstreuung an Ammoniumnitrat

In Kooperation mit dem NIST wurden bei BESSY II am Plangittermonochromatorstrahlrohr der PTB für Undulatorstrahlung RIXS-Spektren von Ammoniumnitrat mithilfe eines kalibrierten wellenlängendispersiven Gitterspektrometers aufgenommen und mit OCEAN-Rechnungen verglichen. Hierbei konnte ein Schema zur Erklärung von Lebensdauererweiterungen in  $\sigma$ -Zuständen bestätigt werden. (R. Unterumsberger, FB 7.2, rainer.unterumsberger@ptb.de)

#### Internationaler Ringvergleich zur Schichtdickenbestimmung von Nano-Schichten

Nano-Schichten aus der Halbleiterindustrie werden immer dünner und haben einen komplexen Aufbau aus verschiedenen nano-skaligen Schichten. Hierzu wurde ein internationaler Ringvergleich vom taiwanesischen Forschungsinstitut ITRI (Industrial Technology Research Institute) organisiert, der die Ergebnisse von Röntgenfluoreszenz- und Röntgenreflektometriemessungen berücksichtigt. Mitarbeiter der AG *Röntgenspektrometrie* haben bei BESSY II durch eine referenzprobenfreie Quantifizierung relevanter Massendepositionen durch Röntgenfluoreszenzanalyse erfolgreich zu dieser Vergleichsstudie beigetragen. (P. Hönicke, FB 7.2, philipp.hoenicke@ptb.de)

#### Internationale Standardisierung für SQUID-Sensoren beginnt

Das Fachgebiet der supraleitenden Elektronik ist neben supraleiter-basierten Energie- und Magnettechnologien ein wesentlicher Sektor der angewandten Supraleitung. Auf Initiative des Technischen Komitees 90 „Supraleitung“ der International Electrotechnical Commission (IEC) und unter Beteiligung der PTB in der beauftragten Arbeitsgruppe ist jetzt als erste maßgebliche Aktivität zur Standardisierung in der Kryoelektronik die Ausarbeitung des Internationalen Standards „IEC 61788-22-1: Supraleitung – Teil 22-1: Supraleitende elektronische Bauelemente“ erfolgt. Der Standard beinhaltet allgemeine Terminologien und Spezifikationen für verschiedene supraleitende Sensoren und Detektoren, seine Veröffentlichung wird im April 2017 erfolgen. Unter den supraleitenden Sensoren und Detektoren haben SQUID-Sensoren derzeit die höchste kommerzielle und metrologische Bedeutung. Die PTB hat deshalb

die weitere Erarbeitung von Charakterisierungsvorschriften für SQUID-Sensoren und die Durchführung von ersten Vergleichsmessungen initiiert. (J. Beyer, FB 7.2, joern.beyer@ptb.de)

#### SQUID-Messplatz für die Kooperation mit dem NIM China

Im Berichtszeitraum wurde auf der Grundlage einer Kooperation zwischen der PTB und dem NIM, dem Nationalen Metrologischen Institut Chinas, ein Messplatz zur Charakterisierung von SQUIDs eingerichtet und den Kollegen aus dem NIM übergeben. Kernstück des Messplatzes ist ein an der PTB gefertigter Messstab mit einer Blei/Messing-Abschirmung, mit dem SQUIDs in einer ein- oder zweistufigen Anordnung in flüssigem Helium bei der Badtemperatur von 4,2 K charakterisiert werden können. Inzwischen wird der Messplatz am NIM erfolgreich genutzt, um eigenentwickelte SQUIDs mit supraleitenden – normaleitenden – supraleitenden (SNS) Tunnelkontakten mit NbSi als Barriere zu charakterisieren. (S. Bechstein, FB 7.2, sylke.bechstein@ptb.de)

#### Empfehlungen für die Darstellung der ITS90 mit Platinthermometern

Die online publizierte Broschüre „Guide to the realization of the ITS90“ enthält Empfehlungen des Konsultativkomitees für Thermometrie (CCT) zur Darstellung der Internationalen Temperaturskala ITS90 auf höchstem metrologischen Niveau. Im für die Industrie wichtigen Temperaturbereich von 25 K bis 1235 K erfolgt die Darstellung mithilfe von Präzisions-Platin-Widerstandsthermometern. Die auf der Basis neuester Erkenntnisse abgestimmten Empfehlungen erlauben, die Temperaturmessung mit Platin-Thermometern international noch besser zu vereinheitlichen und insbesondere die Abschätzung der Messunsicherheit zu vervollkommen. (B. Fellmuth, FB 7.4, bernd.fellmuth@ptb.de)

#### TEMPMEKO-Konferenz in Polen

Für die Temperaturmetrologen besonders bedeutsam war die alle 3 Jahre stattfindende Konferenz „International Symposium on Temperature and Thermal Measurements in Industry and Science“, kurz TEMPMEKO. Im Juni 2016 trafen sich in Zakopane, Polen, 370 führende Wissenschaftler aus 46 Ländern und diskutierten in über 380 Beiträgen u. a. neue Entwicklungen auf dem Gebiet der Skalendarstellung und Weitergabe, der Entwicklung neuartiger Sensoren und der neuen Definition des Kelvins. Die Thermometriker aus dem Fachbereich 7.4 *Temperatur* waren an 19 Beiträgen ihrer internationalen Bedeutung entsprechend beteiligt. Direkt

im Anschluss an die Konferenz fanden zahlreiche Satellitentreffen der Arbeitsgruppen des Konsultativkomitees für Thermometrie (CCT) statt. (J. Fischer, FB 7.4, joachim.fischer@ptb.de)

### **Information zur Neudefinition der Temperatureinheit Kelvin veröffentlicht**

Das Konsultativkomitee für Thermometrie (CCT) hat eine kurze, allgemeinverständliche Information zur für das Jahr 2018 erwarteten Neudefinition der Temperatureinheit Kelvin auf der Webseite des BIPM veröffentlicht ([www.bipm.org/en/committees/cc/cct/publications-cc.html](http://www.bipm.org/en/committees/cc/cct/publications-cc.html)). Diese Information wurde in der Thermometrie-Arbeitsgruppe für das Internationale Einheitensystem (CCT TG-SI) unter der Leitung der PTB erarbeitet und fasst die wesentlichen Vorteile der neuen Definition zusammen: Neue primäre Temperaturmessmethoden werden erlaubt, jedoch behalten die bisherigen Thermometerkalibrierungen ihre Gültigkeit. Die Unsicherheit der Temperaturmessung kann durch innovative Methoden kontinuierlich verbessert und an den zukünftigen Stand der Technik angepasst werden, ohne dass eine weitere Änderung der Definition des Kelvins notwendig wird. Damit ist die neue Definition besonders universell und zukunftsicher. (J. Fischer, FB 7.4, joachim.fischer@ptb.de)

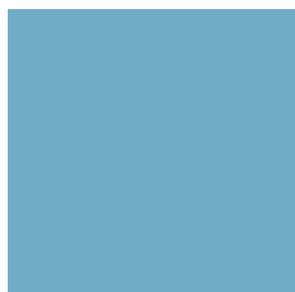
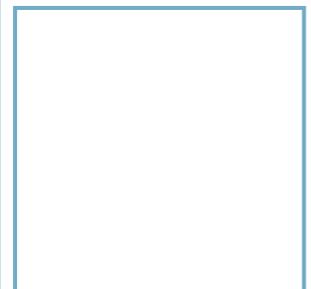
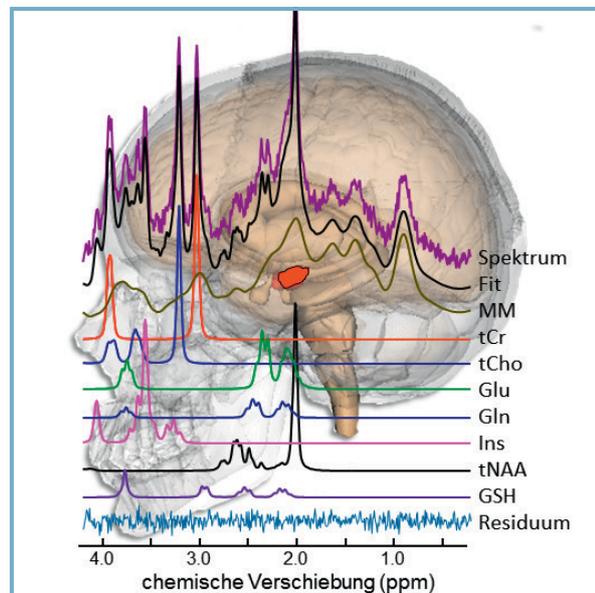
### **Empfehlungen für den Gebrauch von Gasreibungsvakuummetern bei internationalen Vergleichen**

Gemeinsam mit der Arbeitsgruppe „Druck und Vakuum“ des CCM hat die PTB Empfehlungen für den Gebrauch von Gasreibungsvakuummetern bei internationalen Vergleichen ausgearbeitet. Gasreibungsvakuummeter („Spinning rotor gauges“) werden als Transfer- und Bezugsnormale von  $10^4$  Pa bis 1 Pa eingesetzt, weil sie langzeit- und transportstabil sind, wenn entsprechende Vorkehrungen getroffen werden. Unter anderem wird empfohlen, den Rotor des Gasreibungsvakuummeters unter Vakuum zu versenden und mit einem Federmechanismus, der zuerst von der PTB entwickelt wurde, zu fixieren. (K. Jousten, FB 7.5, karl.jousten@ptb.de)



# Abteilung 8

## Medizinphysik und metrologische Informationstechnik



Die zunehmende Relevanz altersbedingter und chronischer Krankheiten wie z. B. Krebs, kardiovaskuläre oder neurodegenerative Krankheiten erfordert neue Ansätze und verbesserte Methoden für die medizinische Diagnose und Therapie. Dabei sind zuverlässige Messverfahren auf der Ebene von Molekülen, Gewebe und Organen eine wesentliche Voraussetzung sowohl für die Erforschung biomedizinischer Grundlagen als auch in der medizinischen Praxis. Eine wichtige Herausforderung für die Medizinphysik besteht in der Weiterentwicklung quantitativer Messverfahren für bildgebende Verfahren und in der Laboratoriumsmedizin, um eine vergleichbare Diagnose und Therapiekontrolle zu gewährleisten. Wie in anderen Feldern der Wirtschaft und Gesellschaft spielt auch in der Medizin zunehmend die Digitalisierung eine wichtige Rolle. Ziel ist es, durch die Vernetzung und Verarbeitung von Messdaten, bessere Diagnoseverfahren und maßgeschneiderte Therapien zu konzipieren. Dies erfordert Entwicklungen sowohl im Bereich der Medizinphysik als auch in der statistischen Datenanalyse und Informationstechnologie.

In der Medizinphysik werden neue quantitative Verfahren für unterschiedliche Bildgebungsverfahren entwickelt, um beispielsweise biophysikalische Größen zu messen. Daneben werden zur Vergleichbarkeit von Bilddaten physikalische Normale entwickelt, die in multizentrischen Studien eingesetzt werden können, um systematische Unterschiede zwischen Standorten, Gerätetypen und Herstellern zu ermitteln. Für die Metrologie in der Labor Diagnostik werden durchflusszytometrische Messverfahren für Zellen, DNA-Fragmente und (Bio-) Moleküle entwickelt, mit dem Ziel, Referenzmessverfahren und Referenzmesswerte für die gesetzlich vorgeschriebene Qualitätssicherung zur Verfügung zu stellen.

Multiparametrische Messdaten (In-vitro-Diagnostik, Erbinformation, Vitalparameter und multimodale Bilddaten) bilden die Grundlage für die medizinische Diagnostik und müssen daher genau, zuverlässig und vergleichbar sein. Neben einer direkten Verwendung durch den Arzt wird zukünftig eine systematische Analyse durch ein elektronisch gestütztes Gesundheitsmanagement (E-Health) eine wichtige Rolle spielen. Dies kann zur Klassifizierung von Patientengruppen eingesetzt werden. Dabei

wird das eigentliche Potenzial der Daten derzeit nur unzureichend genutzt, da Vergleichbarkeit, Qualität (Standardisierung) und Sicherheit vernetzter Daten bisher noch nicht hinreichend gewährleistet sind. Dazu wird an neuen Ansätzen zur Analyse großer multiparametrischer Daten und Referenzarchitekturen für eine sichere Informationstechnologie vertraulicher Daten gearbeitet. Um diese strategisch wichtigen Themenfelder anzugehen, ist eine enge interdisziplinäre Zusammenarbeit mit akademischen, industriellen und klinischen Partnern von essenzieller Bedeutung. Dafür wird insbesondere die exzellente Wissenschaftslandschaft Berlin durch gemeinsame Drittmittelprojekte und Promotionsarbeiten im DFG-Graduiertenkolleg „Biophysical quantitative medical Imaging towards clinical diagnosis –BIOQIC“ und in der Helmholtz Research School on Security Technologies (HRSST) genutzt.

### Zur Biochemie des Mandelkerns

Mithilfe der Magnetresonanztomographie (MRS) lassen sich Stoffwechselprodukte (Metaboliten) im Gehirn des lebenden Menschen nicht-invasiv quantifizieren. Die genaue Kenntnis solcher Metabolitenkonzentrationen erlaubt es, die Funktion unseres Gehirns auf biochemischer Ebene zu untersuchen. Mit der Entwicklung neuer MRS-Methoden leistet die PTB deshalb einen wichtigen metrologischen Beitrag zur Objektivierung in der Neurologie und Psychiatrie und für neue Ansätze zur Diagnostik und Therapiekontrolle. Für die Neurowissenschaften ist die Biochemie der Amygdala („Mandelkern“) wegen deren zentraler Rolle für Emotionen, Gefahrenanalyse und Erregungswahrnehmung sowie bei zahlreichen psychiatrischen Störungen von besonderem Interesse. Quantitative Konzentrationsbestimmungen in der Amygdala sind allerdings aufgrund ihrer tiefen Lage im Gehirn und ihrer geringen Größe besonders schwierig. Als wesentlichen Schritt zur Etablierung eines neurochemischen Profils der Amygdala hat die PTB ein Instrumentarium für die quantitative MRS bei 3 Tesla in dieser Region entwickelt. Dabei werden durch Kombination einer Technik zur Maximierung der Magnetfeldhomogenität in der Amygdala mit einer Messsequenz mit sehr kurzer Echozeit und Unterdrückung äußerer Störsignale MR-Spektren mit maximalem Signal-Rausch-Verhältnis akquiriert. Die anspruchsvolle Nachverarbeitung der Spektren einschließlich der Integration optimierten Vorwissens in die Auswertung erlaubt erstmals die Quantifizierung von sieben neurochemisch relevanten Substanzen mit geringer bis mittlerer Messunsicherheit; darunter der

Titelbild:

Empfindliche Magnetresonanztomographie zur quantitativen Messung des Stoffwechsels im Gehirn mit geringer Messunsicherheit

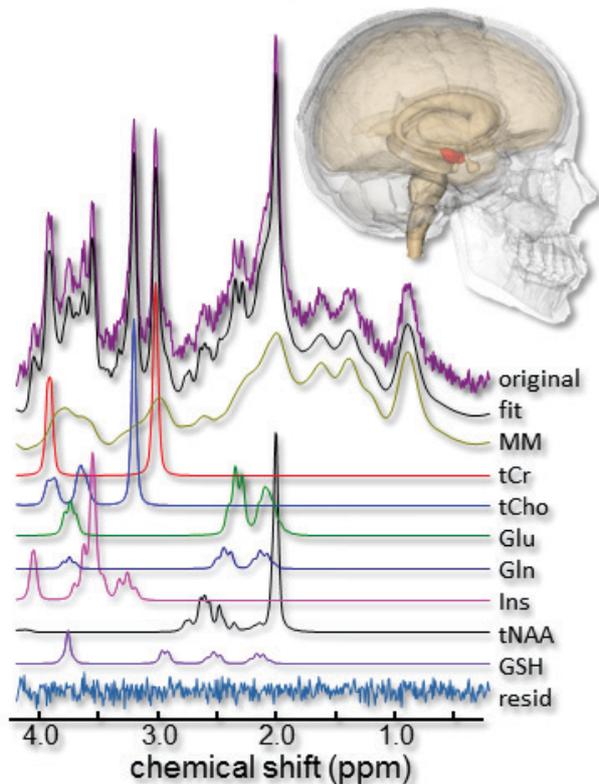


Bild 1: Anatomische Abbildung der Amygdala (rot) im Gehirn (Bild: Wikipedia) und Magnetresonanzspektrum („original“) aus der Amygdala einer gesunden Versuchsperson, aufgenommen bei 3 Tesla. Optimiertes Vorwissen für die Auswertung des Spektrums erlaubt aus dem Fit die quantitative Bestimmung der in Konzentrationen zwischen 2 mmol/l und 10 mmol/l vorliegenden Metaboliten Creatin + Phosphocreatin (tCr), totales Cholin (tCho), Glutamat (Glu), myo-Inositol (Ins) und N-Acetylaspartat (NAA) + NAA-Glutamat (tNAA) mit Messunsicherheiten unter 10 %. Glutamin (Gln) und Glutathion (GSH) sind in der Amygdala mit geringeren Konzentrationen vorhanden und können nur mit höheren Messunsicherheiten bestimmt werden.

wichtige Neurotransmitter Glutamat und die neuroprotektive Verbindung Glutathion.

### Wie fließt das Blut in den Halschlagadern?

In der westlichen Welt ist der Hirnschlag eine der fünf häufigsten Todesursachen. 87% der Hirnschläge sind ischämisch, d. h. verursacht durch eine Blockade der Hirngefäße aufgrund von Plaques. Letztere bilden sich in der Regel in Gefäßen außerhalb des Hirns, z. B. im Herzen, der Aorta oder in der Bifurkation der Halschlagadern (Karotiden) und wandern dann durch die Blutgefäße ins Hirn. Die Entstehung und Entwicklung dieser Plaques ist bisher nicht vollständig verstanden, es wird allerdings vermutet, dass neben anderen Risikofaktoren die Geschwindigkeit des Blutflusses und das Strömungsprofil des Blutes einen Einfluss auf die Entstehung und Entwicklung von Plaques haben.

Die Karotidenbifurkation (Bild 2) ist eine Stelle mit häufig vorkommenden Plaques aufgrund langsamer Fluggeschwindigkeiten. Um das Fortschreiten der Plaques und die Wahrscheinlichkeit des Ablösens dieser Plaques in der Bifurkation genauer abschätzen zu können, ist eine Charakterisierung des Plaques und eine Bestimmung des umgebenden Blutflussprofils notwendig.

Beides lässt sich durch die Magnetresonanztomografie (MRT) realisieren: MRT ist ein bildgebendes Verfahren, welches nicht nur Kontraste zwischen unterschiedlichen Gewebearten mit Submillimeterauflösung darstellen kann mit ihr lässt sich auch nichtinvasiv das vektorielle Geschwindigkeitsfeld des Blutflusses innerhalb eines 3D-Volumens örtlich und zeitlich aufgelöst messen. Diese quantitative MR-Flussbildgebung, auch „4D-Fluss-MRT“ genannt, hat allerdings den Nachteil, dass die Datenaufnahme mit ca. 10–20 Minuten vergleichsweise lang ist. Bisher wird sie daher nur in Studien, aber noch nicht in der klinischen Routine eingesetzt. Darüber hinaus ist eine hohe räumliche Auflösung nur mit substantiellen Einbußen des Signal-zu-Rausch-Verhältnis (signal to noise ratio, SNR) zu erzielen.

In einem Kooperationsprojekt mit der University of Minnesota in Minneapolis, MN, USA, und der Northwestern University in Chicago, IL, USA, wurden beide Probleme gleichzeitig adressiert: Es wurden erstmals Flussmessungen in den Karotiden in einem 7-Tesla-MRT mithilfe einer speziell hergestellten Sende-/Empfangsspule durchgeführt, und es wurde eine beschleunigte Aufnahme der Karotidenbifurkation erzielt, indem beide Karotiden *gleichzeitig* durch eine sogenannte „Simultane Multi-Schicht-“(SMS)-Anregung aufgenommen werden konnten. Letzteres ermöglicht eine Reduktion der Aufnahmezeit um etwa einen Faktor 2. Eine weitere Beschleunigung um einen Faktor 1,5 wurde durch die konventionelle parallele Bildgebung ermöglicht, sodass in der Summe die Aufnahme um einen Faktor 3 beschleunigt werden konnte. Neben dieser Aufnahme wurde eine konventionelle, nicht beschleunigte 4D-Flussbildgebung durchgeführt und die quantitativen Ergebnisse beider Aufnahmen statistisch ausgewertet. Es zeigten sich keine Unterschiede bei den maximalen Blutflussgeschwindigkeiten. Künftig sollen noch höhere Beschleunigungsfaktoren erreicht werden, indem in der zeitlichen Dimension weniger Daten aufgenommen werden, ohne dabei an zeitlicher Auflösung zu verlieren. Dieser scheinbare Widerspruch kann durch spezielle Rekonstruktionsverfahren gelöst werden. Das langfristige Ziel dieser Arbeiten liegt darin, ei-

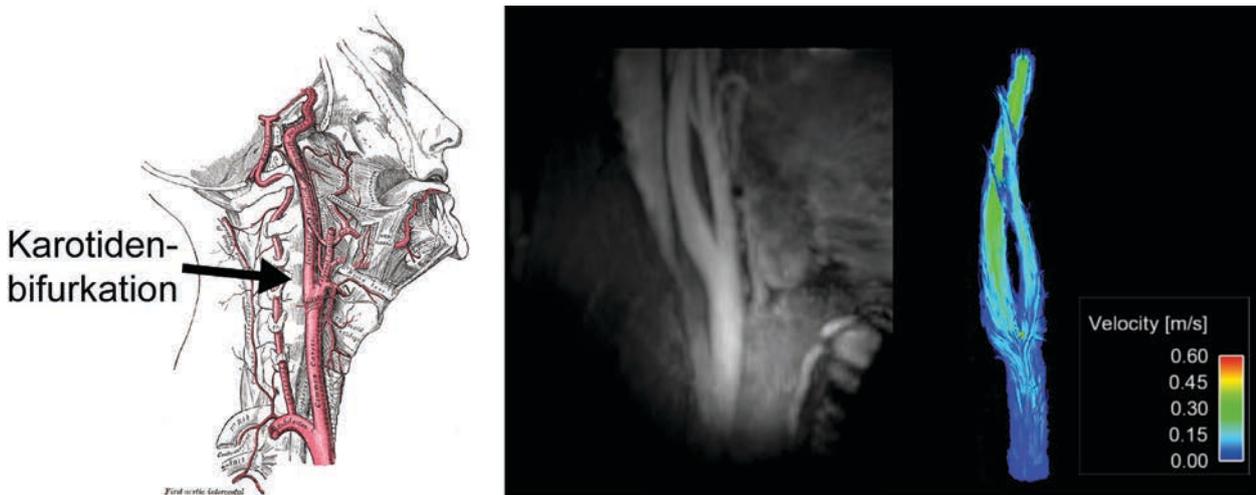


Bild 2: Links: anatomische Darstellung der Halsgefäße inklusive der Karotidenbifurkation (Gray's Anatomy 1918, nach Wikipedia). Mitte: MR-Angiografie-Darstellung der humanen Karotidenbifurkation, aufgenommen bei 7 Tesla. Rechts: farbkodiertes Geschwindigkeitsvektorfeld.

nen Teil der erzielten Aufnahmegeschwindigkeit in eine hohe räumliche Auflösung des Geschwindigkeitsvektorfeldes zu investieren, wobei eine klinisch akzeptable Messzeit von etwa acht Minuten nicht überschritten werden soll.

## Erfolgreiche Weiterentwicklung hochempfindlicher magnetischer Sensoren für die Medizinphysik

Das Streben nach immer empfindlicheren Messungen stimuliert immer wieder neue technische Entwicklungen. Dies hat sich in den letzten Jahren auch im Bereich der magnetischen Messtechnik gezeigt. Hier wurden sowohl bei der Weiterentwicklung der etablierten SQUID-Technologie wie auch bei der Entwicklung neuer Sensorik bemerkenswerte Fortschritte erzielt. Supraleitende Quanteninterferometer (SQUIDs) sind seit ihrer Erfindung die empfindlichsten Magnetfeldsensoren, und die Entwicklungen der PTB in dieser Messtechnik waren in den letzten Jahrzehnten immer an der Weltspitze. Diesem Trend konnte im vergangenen Jahr ein weiteres Highlight hinzugefügt werden: In einer Zusammenarbeit der Fachbereiche 7.2 und 8.2 wurde ein Messsystem entwickelt, das im magnetisch geschirmten Raum BMSR-2 der PTB ein Rauschniveau von  $175 \text{ aT}/\sqrt{\text{Hz}}$  erreicht. Zum Vergleich: Kommerzielle SQUID-Systeme erreichen selten weniger als  $2 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ , sind also um mindestens eine Größenordnung unempfindlicher.

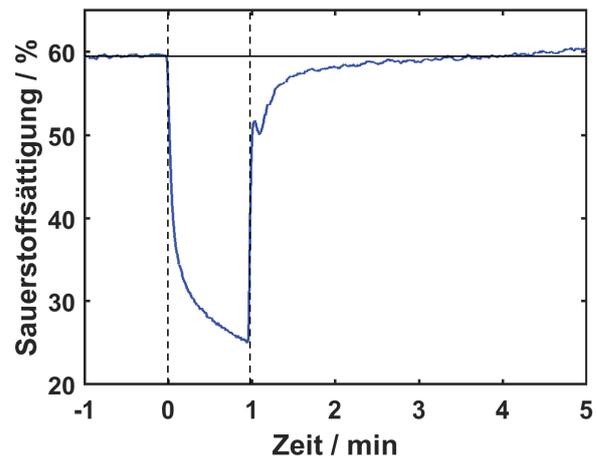
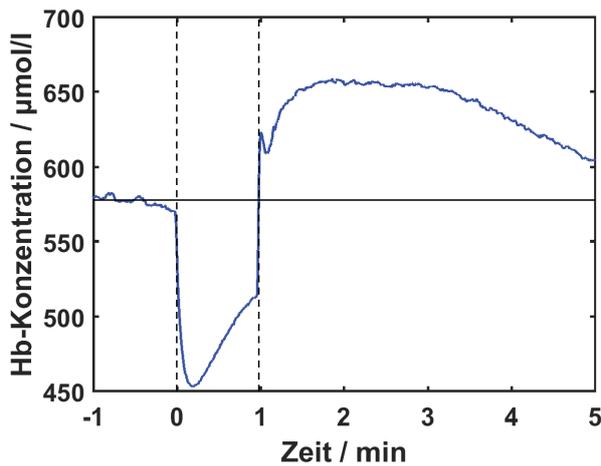
Anders als SQUIDs sind optisch gepumpte Magnetometer (OPM) nicht auf eine gekühlte Umgebung angewiesen. Sie können vielmehr über Glasfaser-

kabel flexibel an den gewünschten Positionen angebracht werden, ähnlich wie es bei den bioelektrischen Aufzeichnungen des EKG oder EEG üblich ist. Ihre Funktion basiert auf dem optischen Nachweis der Spinpräzession in Alkaligasen. In Zusammenarbeit mit dem NIST werden in der PTB schon seit mehreren Jahren derartige Sensoren getestet. Inzwischen haben diese OPM mit  $10\text{--}20 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$  zwar noch nicht die Empfindlichkeit von SQUIDs erreicht, doch bietet ihre flexible Handhabbarkeit und Störunempfindlichkeit andere Vorteile. Dies konnte beispielhaft zur Aufzeichnung der Herzaktivität von Feten demonstriert werden. Die OPM wurden wie Elektroden am Bauch und auf dem Brustkorb einer schwangeren Probandin befestigt. Durch die simultane Messung der materalen Herzaktivität konnte diese vom Magnetkardiogramm des Fetus getrennt werden.

Optisch gepumpte Magnetometer sind zurzeit immer noch durch ihre relativ schmale Bandbreite und ihre geringere Empfindlichkeit begrenzt. Doch eröffnen ihre grundsätzlich andersartigen technischen Eigenschaften neue messtechnische Anwendungsbereiche, die in den nächsten Jahren untersucht werden.

## Optisch gestützte Mess- und Bildgebungsverfahren für die präzise und individualisierte medizinische Diagnostik

Die zunehmende Relevanz altersbedingter Krankheiten wie Krebs, kardiovaskuläre oder neurodegenerative Krankheiten erfordert neue Ansätze und verbesserte Methoden für die medizinische Diagnose und Therapie. Um möglichst frühzeitig präzise und individualisierte Therapieentscheidungen treffen zu können, werden insbesondere quantitative differenzialdiagnostische Methoden zur genaueren und zuverlässigen Bestimmung krankheitsspezi-



fischer Parameter benötigt. Optisch gestützte Mess- und Bildgebungsverfahren leisten hierzu wertvolle Beiträge. Im Fachbereich „Biomedizinische Optik“ der PTB werden entsprechende Verfahren entwickelt, untersucht und zusammen mit klinischen Partnern erprobt.

Für die Metrologie in der Labordiagnostik werden durchflussanalytische und mikroskopische Messverfahren sowie Verfahren zur quantitativen Nucleinsäurediagnostik von Zellen und (Bio-) Molekülen untersucht. Ziel ist die Entwicklung von (neuen) Referenzmessverfahren sowie die Erweiterung des Angebots von Referenzmesswerten für die gesetzlich vorgeschriebene Qualitätssicherung laboratoriumsmedizinischer Untersuchungen. Neue potenzielle Referenzmessverfahren, die untersucht werden, betreffen derzeit die HIV-Diagnostik, die Stammzellzählung sowie den Immunstatus. Weitere Ziele sind die Entwicklung neuer durchflussanalytischer Messverfahren für die Messung der Konzentration von Nanopartikeln mit Anwendungspotenzial für Viren, extrazelluläre Vesikel und Blutersatzstoffe sowie für eine DNA-Fragmentanalyse. Dies umfasst auch die Entwicklung und Erforschung mikrofluidischer Durchfluss-Messensoren.

Für die nicht-invasive quantitative Bestimmung von Biomarkern (z. B. Hämoglobinkonzentration, Sauerstoffsättigung) im Gewebe sowie zur In-vivo-Darstellung krankheitsbedingter molekularer Veränderungen mithilfe fluoreszenzmarkierter Sonden werden optisch-spektroskopische Mess- und Bildgebungsverfahren entwickelt und in Zusammenarbeit mit klinischen Partnern untersucht. Mittelfristige Ziele sind die Entwicklung und Bereitstellung von Referenzmethoden für die Kalibrierung und Validierung von Messverfahren für die Gewebeoximetrie sowie Verfahren für die lokale Quantifizierung von Fluoreszenz-Kontrastmitteln in Gewebe in vivo. Optische Messverfahren für die Gewebee-

Bild 3: Mittels Nahinfrarotspektroskopie in diffuser Reflexion bestimmte Hämoglobinkonzentration (links) und Sauerstoffsättigung (rechts) in der Niere eines Versuchstieres (Ratte) während einer Okklusion der Aorta.

ximetrie werden z. B. in einem gemeinsamen Projekt mit dem Max-Delbrück-Centrum für molekulare Medizin (AG T. Niendorf) und dem Institut für Physiologie der Charité Berlin (AG E. Seeliger) zur Kalibrierung der BOLD-(Blood oxygenation level-dependent)-Magnetresonanzbildgebung der Nieren untersucht. Eine quantitative BOLD-MR-Bildgebung der Durchblutung und der Sauerstoffsättigung der Nieren wäre für die nicht-invasive Untersuchung von (Bild 3) Hypoperfusion und Hypoxia als Schlüsselparameter der Pathophysiologie bei akutem Nierenversagen und bei chronischen Nierenerkrankungen sehr wertvoll.

### Neue fachbereichs- und abteilungsübergreifende Kooperationen zur Modellierung und Datenanalyse in medizinischen Anwendungen

Im vergangenen Jahr hat der Fachbereich 8.4 *Modellierung und Datenanalyse* neue Kooperationen zu Anwendungen von mathematischen Verfahren in der Medizinphysik begonnen. Innerhalb der Abteilung beschäftigen sich zwei Doktorarbeiten mit der Verbesserung von Datenanalyseverfahren für quantitatives Imaging in der Magnetresonanztomographie (Fachbereiche 8.1 *Medizinische Messtechnik* und 8.4) sowie mit der Modellierung und dem inversen Problem der Durchflusszytometrie (Fachbereich 8.3 *Biomedizinische Optik* und 8.4). Ergebnisse aus diesen beiden Projekten sind unten detaillierter beschrieben. Ein drittes Projekt zur Quantifizierung der Bildqualität bei auf ionisierender Strahlung beruhenden Verfahren der medizinischen Bildgebung ist Gegenstand einer neuen Zusammenarbeit der Fachbereiche 6.2 *Dosimetrie und medizinische*

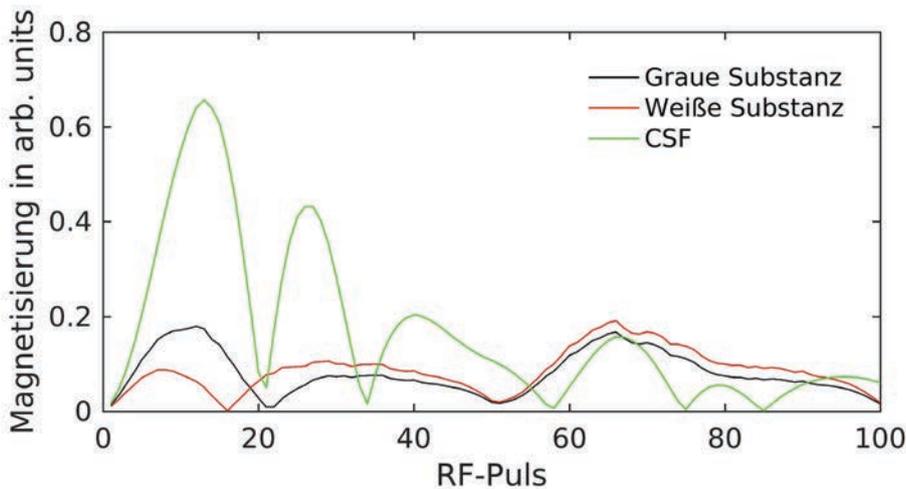


Bild 4: Verlauf der Magnetisierung unterschiedlicher Hirngewebetypen für eine zufällige Anregungssequenz

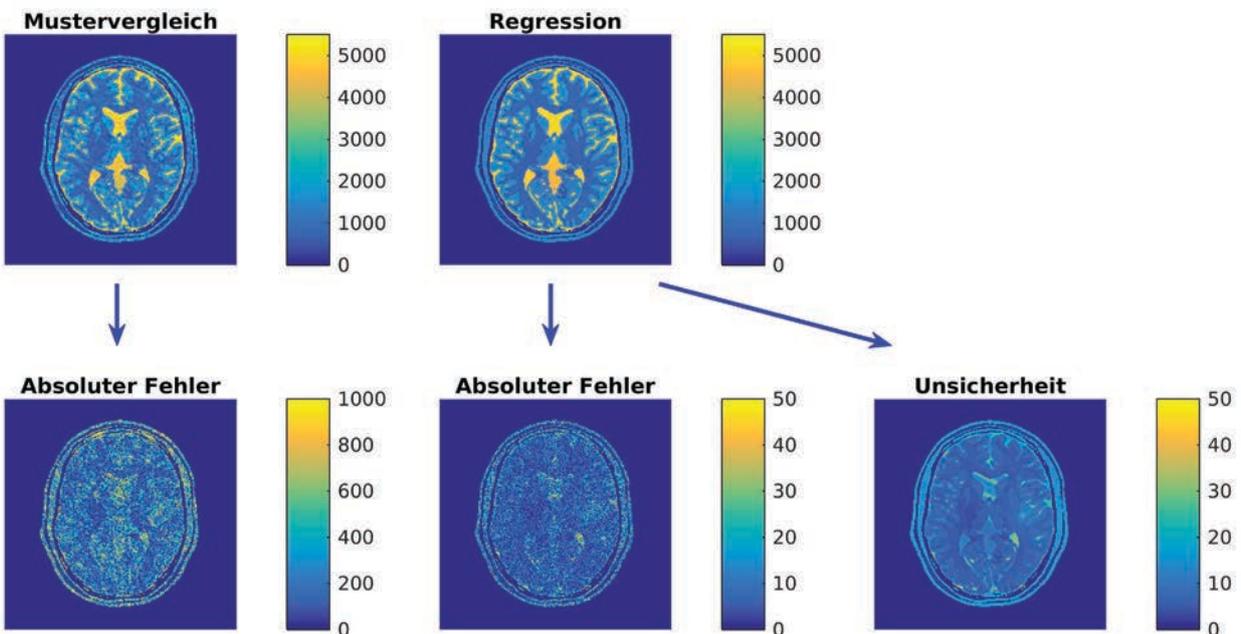
Strahlentherapie und 8.4, an dem Wissenschaftler der PTB-Standorte Braunschweig und Berlin in den nächsten Jahre gemeinsam arbeiten werden und dabei mathematisch-statistische Expertise mit Know-how über experimentelle Verfahren und medizinische Anwendungen kombinieren werden.

**Neues „Large-Scale“-Datenanalyseverfahren für quantitative Magnetresonanztomografie**

Die Magnetresonanztomografie ist ein Standardverfahren in der klinischen Praxis, bei dem typischerweise Bilder qualitativ beurteilt werden. Derzeit stehen neuartige Verfahren im Fokus, die anstelle der qualitativen Information eine quantitative Bestimmung von Gewebeparametern in der klinischen Praxis ermöglichen sollen. Ein vielversprechendes Verfahren stellt dabei das sogenannte „Magnetic Resonance Fingerprinting“ dar, welches eine gleichzeitige Bestimmung von mehreren Gewebeparametern

erlaubt. Das Verfahren arbeitet mit einer zufälligen Folge von Magnetisierungsanregungen. Hiermit verbunden ist ein herausforderndes Datenanalyseproblem, bei dem Gewebeparameter für eine große Anzahl von Bildpunkten (>100 000) aus den Messdaten bestimmt werden müssen. Bisher wurden hierfür Mustervergleichsverfahren verwendet, die eine Bibliothek von mithilfe eines physikalischen Modells gebildeten Testmustern verwenden. Im Fachbereich *Modellierung und Datenanalyse* wurde ein neuartiges Analyseverfahren entwickelt, bei dem die Gewebeparameter durch Lösung eines „Large-

Bild 5: Vergleich der in einer Simulation ermittelten Rekonstruktionsergebnisse für die T1-Relaxationszeit (in ms) des Mustervergleichsverfahrens sowie der neu entwickelten Methode („Regression“). Die neue Methode führt nicht nur zu einer quantitativen Bildgebung, sondern liefert auch deren Unsicherheiten. Die Simulationsergebnisse zeigen, dass diese Unsicherheiten die Genauigkeit („absolute Fehler“) der neuen quantitativen Bildgebung zuverlässig charakterisieren.



Scale“-Regressionsprobleme ermittelt werden. Das neue Verfahren verwendet einen statistischen Modellansatz, mit dem eine verbesserte Schätzung der Gewebeparameter möglich wird. Darüber hinaus können mit der neuen Methode erstmals auch Unsicherheiten für die geschätzten Gewebeparameter ermittelt werden.

In Bild 4 wird anhand der unterschiedlichen Magnetisierungsverläufe verschiedener Gewebetypen das Prinzip des „Fingerprinting“-Ansatzes illustriert. Bild 5 zeigt in einer Simulation ermittelte Rekonstruktionsergebnisse. Im Vergleich zu dem Mustervergleichsverfahren werden mit der neuen Regressionsmethode deutlich kleinere Rekonstruktionsfehler für die Gewebeparameter erzielt. Die verbleibenden Rekonstruktionsfehler werden darüber hinaus sehr gut durch die über den statistischen Ansatz ermittelten Unsicherheiten charakterisiert.

**Optische Durchflusszytometrie: Computermodelle zur realistischen Beschreibung von Lichtstreuung an nativen roten Blutzellen**

Optische Durchflusszytometrie ist eines von mehreren Messverfahren, die routinemäßig in der Labormedizin zur Erstellung von Blutbildern genutzt werden (Bild 6a). Hierbei wird Laserlicht an einzelnen biologischen Zellen gestreut und aus dem Streulicht Information über die Zellen gewonnen, wie etwa Größe und Proteingehalt. Zur Vermessung der Erythrozyten (roten Blutzellen) werden diese bei konventionellen Verfahren mit chemischen Reagenzien

vorbehandelt, um sie von ihrer nativen, bikonkaven Scheibenform (Bild 6b) in Kugeln zu überführen. Dies vereinfacht die Datenauswertung stark, da die Lösung des mathematischen Lichtstreuproblems an einer Kugel exakt bekannt ist. Die chemische Aufkuglung ist allerdings nicht bei allen Patienten erfolgreich, und in jedem Fall wird die Struktur der Zellmembran stark verändert. Ein optisches Messverfahren für native Erythrozyten ist daher wünschenswert.

In der AG 8.32 *Durchflusszytometrie und Mikroskopie* wurden native, d. h. nicht kugelförmige Erythrozyten im Durchflusszytometer vermessen. Man findet ein bimodales Histogramm für die integrierten Vorwärtsstreuquerschnitte (Bild 6e). Im Falle von kugelförmigen Zellen ist dieses Histogramm unimodal und spiegelt lediglich die Größenverteilung der Zellen sowie die Verteilung ihres Hämoglobingehalts wieder. Die bimodale Verteilung bei nativen Zellen kommt durch die zufälligen räumlichen Orientierungen der Zellen relativ zum Lichtstrahl zustande.

Dieses Experiment wurde in der AG 8.41 *Modellierung und Simulation* mittels Computersimulationen nachgestellt, wodurch verschiedene Einflussgrößen untersucht werden können. Die Lichtstreuung an einzelnen Blutzellen wurde mit der diskreten Dipolapproximation (DDA) simuliert. Hierbei wird ein Streuer durch ein kubisches Gitter von Dipolen angenähert. Das mathematische Streuproblem lässt sich dann für beliebige Geometrien nume-

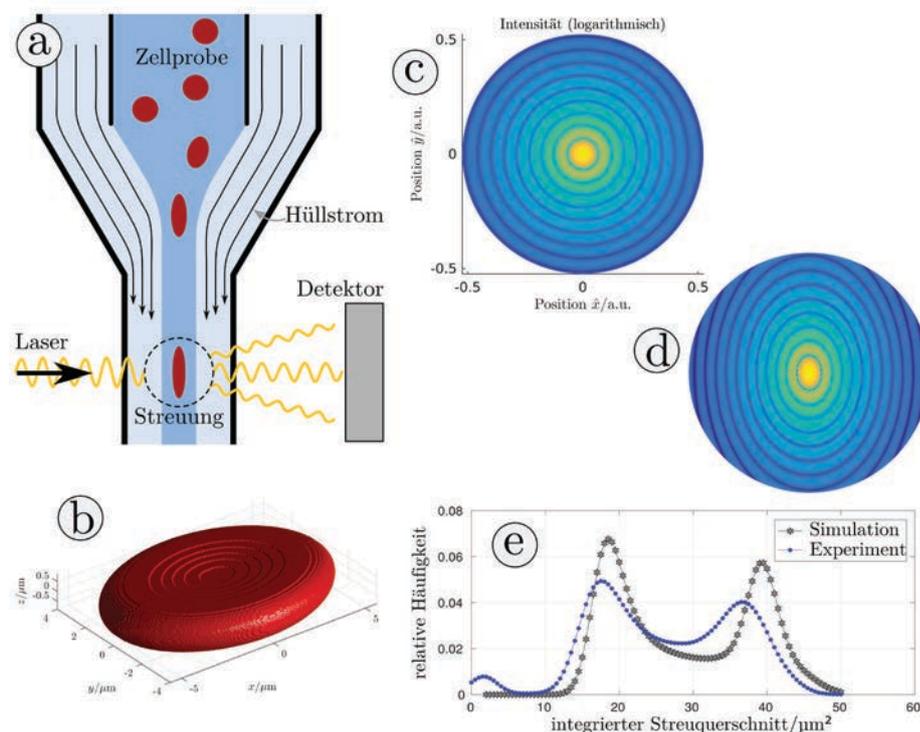


Bild 6: Funktionsprinzip eines Durchflusszytometers (a), Formmodell einer roten Blutzelle (b), Simulierte Streumuster für kreis- (c) und ellipsenförmige (d) rote Blutzellen, Experiment und Simulation der integrierten Streuquerschnitte für ein Ensemble roter Blutzellen mit variierender Größe und Orientierung (e)

risch effizient lösen. Es wurde eine Datenbank von Streulichtmustern für verschiedene Zellgrößen und Orientierungen errechnet. Der Effekt der bimodalen Histogramme lässt sich hiermit nachstellen. Die Übereinstimmung mit dem Experiment ist aber nicht befriedigend, solange man rotations-symmetrische mathematische Formmodelle verwendet, die der Form von Erythrozyten in Ruhe entsprechen (Bild 6c). Erythrozyten sind mechanisch sehr flexibel und ziehen sich daher bei den hohen Strömungsgeschwindigkeiten und -gradienten im Durchflusszytometer in die Länge. Um diesen Effekt zu modellieren, wurden die existierenden Formmodelle erweitert (Bild 6c und b). Die Übereinstimmung des virtuellen Experiments mit zytometrischen Messungen wird dadurch entscheidend verbessert (Bild 6e).

## Metrologie in der digitalen Transformation

Der Fachbereich 8.5 *Metrologische Informationstechnik* der PTB erfüllt wissenschaftlich-technische Querschnitts- und Dienstleistungsaufgaben auf dem Gebiet der Informations- und Kommunikationstechnik (IKT) in der Metrologie. Darunter fällt einerseits die Konformitätsbewertung komplexer Software und IKT-Komponenten in regulierten Messgeräten, Forschungs- und Entwicklungsprojekte zum Technologietransfer als auch die nationale und internationale Harmonisierung des gesetzlichen Messwesens im Bereich Software, Informations- und Kommunikationstechnologie (WELMEC, OIML). Beratungs- und Koordinierungstätigkeiten für Politik und Wirtschaft runden das Aufgabenfeld ab. Des Weiteren führt der Fachbereich die Bauartzulassung von IT-basierten Geldspielgeräten durch.

Die zu formulierenden Anforderungen an die Systeme in den abgedeckten Bereichen werden aufgrund der verwendeten Informationstechnologie zunehmend ähnlicher. Die technologische Entwicklung im Bereich der Informations- und Kommunikationstechnologie und deren Einsatz wird durch

nationale und europäische Initiativen zur Digitalisierung der Wirtschaft beschleunigt. Dies führt zu steigenden Anforderungen im Bereich Software und IT im gesetzlichen Messwesen. Die genutzten Technologien sind vor allem Cloud Computing, Industrie 4.0, Smart Services, intelligente Energienetze und Big Data. Die *Metrologische Informationstechnik* konzentriert sich auf jene Felder, von denen eine langfristige und strategische Wirkung zu erwarten ist, und baut ihre Expertise dort gezielt durch Forschungsarbeiten aus. Dafür wird einerseits durch die Kooperationen in der Wissenschaftslandschaft Berlin durch gemeinsame Promotionsarbeiten unter Beteiligung an der Helmholtz Research School on Security Technologies (HRSST), wo sich die Sicherheitskompetenz aller Berliner Universitäten und der DLR bündelt, gesorgt. Um die Entwicklung dieses Gebietes in der PTB voranzutreiben, wurde zusammen mit der TU Berlin über die Einstein Stiftung eine Nachwuchsgruppe ausgeschrieben, die sich mit der Entwicklung von sicheren und vertrauenswürdigen netzangebundenen Systemarchitekturen beschäftigt. Damit wird die internationale Führungsrolle der PTB im Bereich des Einsatzes der Informations- und Kommunikationstechnologie im gesetzlichen Messwesen national wie international weiter gestärkt und ausgebaut.

## Technologietransfer: Referenzarchitekturen

Industrieverbände äußern zunehmend den Bedarf nach einem Messgerät mit verteilten, teilweise virtualisierten Komponenten. Das Messgerät reduziert sich dabei lokal auf den rudimentären, kostengünstigen Sensor mit Kommunikationsanbindung. Anzeige, Datenspeicher und Prozessierungssoftware sind nicht mehr lokal vorhanden, sondern werden z. B. über Cloud-Services verfügbar gemacht (s. Bild 7). Dieser Übergang wird durch Industrie 4.0 als industriegetriebenes Technologiefeld, die aktuelle, technologieoffen gestalteten Rechtsnormen und die Digitale Agenda der Bundesregierung begünstigt.

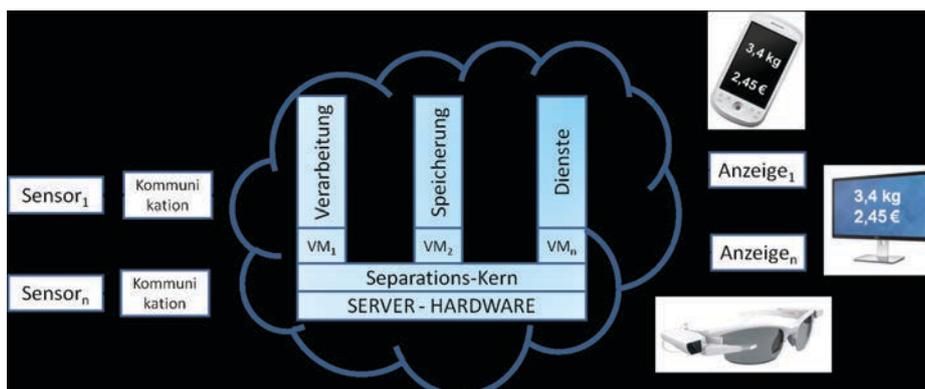


Bild 7: Messgerät mit verteilten und virtualisierten Komponenten

Um Hersteller von Messgeräten bei der Realisierung ihrer innovativen Produkte zu unterstützen und den Konformitätsbewertungsprozess zu verschlanken, entwickelt der Fachbereich 8.5 rechtskonforme Referenzarchitekturen für wesentliche Technologiefelder. So erarbeitet die PTB aktuell Referenzarchitekturen für eingebettete Systeme, Cloud Computing, das Smart Grid und entwirft Handlungshilfen für deren Prüfung. Für diese Basistechnologien entwickelt die PTB Referenzarchitekturen, die rechtlich „akzeptable“ Lösungen darstellen, die „angemessene“ Sicherheit bieten und „einfache“ Verifikationsmethoden für die Marktaufsicht bereitstellen sollen. Damit werden die Bedürfnisse aller Beteiligten im Zulassungs- und Verwendungsprozess adressiert. Die Hersteller erhalten Architekturangebote für innovative Produkte, die einen zügigen Durchlauf durch den Konformitätsbewertungsprozess garantieren. Eine objektiv vergleichbare Risikoanalyse auf Basis internationaler Industriestandards garantiert angemessene IT-Sicherheit und vermeidet damit eine Maßnahmenüberfrachtung. Die Markt- und Verwendungsüberwachung erhält auch für komplexe IT-Lösungen eine von der PTB entwickelte Verifikationsmethode, die ein einfach zu interpretierendes, vertrauenswürdiges Ergebnis liefert. Diese Referenzarchitekturen werden in den Gremien des gesetzlichen Messwesens international und europäisch zur Harmonisierung eingebracht. Im Rahmen von Technologietransferprojekten unterstützt die PTB KMUs, diese Architekturen in neue Produkte zu integrieren. Alle diese Maßnahmen helfen, klassische Innovationshemmnisse im gesetzlichen Messwesen abzubauen und die Marktakzeptanz für neue Technologien zu unterstützen.

### **Europäische Harmonisierung von Sicherheitsanforderungen an Messgeräte**

Nach dem Inkrafttreten der neuen europäischen Messgeräterichtlinie (Measuring Instruments Directive 2014/32/EU) gilt seit dem 20.4.2016 eine neue Anforderung an Messgeräte. Für diese muss vom Hersteller eine angemessene Risikoanalyse durchgeführt werden.

Der Fachbereich 8.5 hat eine Risikoanalysemethode für Software entwickelt, die von Messgeräteherstellern genutzt wird, um die entsprechend geforderte Risikobewertung für Software und IKT-Komponenten anzufertigen. Dabei besteht der Vorteil in der Vergleichbarkeit von Risikoanalysen und der Gleichbehandlung aller Hersteller unabhängig von der Geräteart. Mit dem Ziel, dieses Vorgehen auch europaweit zu harmonisieren, hat eine Projektgrup-

pe der WELMEC-Arbeitsgruppe 7 „Software“ im Januar 2016 damit begonnen, einheitliche Anforderungen an eine Risikoanalyse zu formulieren.

### **Spezifikation für die Implementierung und Prüfung von Software zur Berechnung von Messunsicherheiten**

Der internationale Leitfaden „Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement“ (GUM, ISO/IEC Guide 98-3:2008) regelt die Angabe von Messunsicherheiten in der Messtechnik und findet in der Wissenschaft und der Wirtschaft intensive Anwendung. Der Leitfaden stellt eine Sammlung von „Best Practices“ dar, die teilweise beschreibend, teilweise mathematisch formalisiert und teilweise in Form von Beispielen dargelegt sind. Obwohl schon eine Vielzahl von in den letzten Jahren entstandenen Softwareprogrammen die Umsetzung des Leitfadens unterstützt, enthält der Leitfaden selbst keine konkreten Hinweise für die Implementierung und nachfolgende Validierung solcher Softwareprodukte. Bei der Implementierung und Validierung dieser Programme treten eine große Anzahl von implementierungstypischen Problemen und Fragestellungen auf, deren Lösung nicht expliziter Gegenstand des Leitfadens ist, sehr wohl aber wesentlich für eine GUM-konforme Implementierung und die Beurteilung der Softwareprogramme hinsichtlich ihrer Konformität mit dem GUM ist. Diese fehlenden implementierungsspezifischen Angaben und Regeln werden im Fachbereich 8.5 erarbeitet und in einem separaten Leitfaden „Spezifikation für die Implementierung und Prüfung von Software zur Berechnung von Messunsicherheiten“ zusammengestellt.

## In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

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

### Grundlagen der Metrologie

#### 8-Kanal-pTx-Kopfspule mit hoher $B_1$ -Effizienz für die 7-Tesla-MRT fertiggestellt

Aufbauend auf einem experimentell erprobten Design wurde eine 8-kanalige 7-T-Sende/Empfangsspule hoher  $B_1$ -Effizienz konstruiert, mithilfe additiver Verfahren gefertigt und schließlich erfolgreich getestet. Der Aufbau gewährleistet die Anforderungen an Patientensicherheit und Patientenkomfort und soll bei zukünftigen Probandenstudien am 7-T-MRT in Berlin-Buch eingesetzt werden. (H. Pfeiffer, FB 8.1, [harald.pfeiffer@ptb.de](mailto:harald.pfeiffer@ptb.de); F. Seifert, FB 8.1, [frank.seifert@ptb.de](mailto:frank.seifert@ptb.de))

#### Normenkonformität für 7-T-8-Kanal-pTx-Kopfspule bescheinigt

Der 8-Kanal-pTx-Kopfspule für die 7-T-MRT wurde von einer zertifizierten Benannten Stelle Normenkonformität bescheinigt. Grundlage waren Forschungsarbeiten zur Bestimmung der maximalen lokalen spezifischen Absorptionsrate  $psSAR_{10g}$  insbesondere für den mehrkanaligen Sendebetrieb. Damit konnte die Normenkonformität hinsichtlich IEC-60601-1-1 und IEC 60601-2-33 nicht nur für den Standard-Einkanal-Mode, sondern auch für den 8-Kanal-pTx-Mode der 7-T-Kopfspule demonstriert werden. (H. Pfeiffer, FB 8.1, [harald.pfeiffer@ptb.de](mailto:harald.pfeiffer@ptb.de); F. Seifert, FB 8.1, [frank.seifert@ptb.de](mailto:frank.seifert@ptb.de))

#### Aufkonzentrierung von hyperpolarisiertem Xenon im kontinuierlichen Gasstrom

Hyperpolarisiertes Xenongas wird in der Magnetresonanztomografie für biomedizinische und fundamentalphysikalische Experimente eingesetzt. Bisher war es bei vielen Anwendungen nötig, ein aufwendiges Verfahren zur Separation des Xenongases von den anderen Prozessgasen zu verwenden. Durch den Einsatz semipermeabler Membranen ist es nun gelungen, im kontinuierlichen Gasstrom den Hauptbestandteil der Prozessgase zu separieren, ohne die Kernspinpolarisation des Xenongases negativ zu beeinflussen. Mit diesem Verfahren konnte die Xe-Konzentration im Arbeitsmedium um den Faktor zehn erhöht werden. Dies erlaubt nun die direkte Verwendung des hyperpolarisierten Gases aus dem Polarisator ohne aufwendige Zwischenschritte. (W. Kilian, FB 8.1, [wolfgang.kilian@ptb.de](mailto:wolfgang.kilian@ptb.de))

#### Verbundvorhaben zu Untersuchungen der Hämodynamik und Oxygenierung der Niere begonnen

Akute Nierenschädigungen führen zu einer plötzlich einsetzenden Verschlechterung der Nierenfunktionen bis hin zum akuten Nierenversagen. Ohne rasche Diagnostik und Therapie sind sie potenziell lebensbedrohlich und bergen ein hohes Risiko dauerhafter Nierenschädigungen. Um die pathophysiologischen Ursachen für diese Erkrankung besser zu verstehen, sind grundlegende Untersuchungen zur Hämodynamik und Oxygenierung der Niere in Tiermodellen von besonderer Bedeutung. In dem vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Verbundvorhaben „Validierung quantitativer Magnetresonanz-Oxymetrie für Diagnostik und Therapieführung akuter und chronischer Nierenerkrankungen“ werden das Max-Delbrück-Centrum für Molekulare Medizin, die Charité Berlin und die Arbeitsgruppe *Medizinisch-optische Bildgebung* der PTB gemeinsam einen tierexperimentellen Demonstrator aufbauen und für grundlegende Untersuchungen zur Nierenphysiologie einsetzen. Dieser erlaubt die simultanen Untersuchungen zur Nierenphysiologie mittels parametrischer Magnetresonanz-Tomografie, quantitativer Verfahren der integrativen Physiologie und quantitativer Nahinfrarotspektroskopie. (D. Grosenick, FB 8.3, [dirk.grosenick@ptb.de](mailto:dirk.grosenick@ptb.de))

#### Rekonstruktion der optischen Eigenschaften eines gewebeoptischen Phantoms mit zwei Schichten

Eine von der Universität Florenz entwickelte Fit-Methode („Optimal Estimation“) zur Bestimmung der optischen Eigenschaften stark streuender Medien wurde gemeinsam anhand von Phantommessungen der PTB experimentell validiert. Die Rekonstruktionsmethode nutzt einen Bayes'schen Ansatz, bei dem insbesondere A-priori-Informationen für die Fit-Parameter sowie Unsicherheiten fester Parameter in die Auswertung einbezogen werden können. In einem Zweischicht-Flüssigphantom wurden die Absorptionskoeffizienten in beiden Schichten unabhängig variiert. Bis zu 6 Fitparameter konnten aus Messungen der diffusen Reflexion mit Pikosekunden-Zeitauflösung bei einem festen Quelle-Detektor-Abstand ermittelt werden. Bemerkenswert ist, dass die Ergebnisse für den Absorptionskoeffizienten der unteren Schicht eine geringe Unsicherheit und sehr gute Übereinstimmung mit den

Nominalwerten aufwiesen. Derartige Rekonstruktionsverfahren sind eine wichtige Voraussetzung für den Einsatz der zeitaufgelösten Nahinfrarotspektroskopie z. B. zur Bestimmung der Sauerstoffsättigung des Gehirns. Die Ergebnisse wurden im Journal of Biomedical Optics veröffentlicht. (H. Wabnitz, FB 8.3, heidrun.wabnitz@ptb.de)

### **Referenzmessverfahren zur Konzentrationsbestimmung von Viren im Rahmen des EMPIR-Projektes AntiMicroResist**

Im Juni 2016 ist das Projekt „AntiMicroResist“ gestartet. Im Rahmen einer Förderung durch das European Metrology Programme for Innovation and Research (EMPIR) untersucht ein internationales Konsortium unter Beteiligung der Metrologieinstitute NPL (UK), LNE (FRA) und PTB neue Materialien und Methoden zur Detektion, Überwachung und Bewertung antimikrobieller Resistenzen. Bei chronischen Krankheiten ist eine genaue Beobachtung der Pathogene notwendig, um sich entwickelnde Resistenzen rechtzeitig erkennen zu können. Voraussetzung dafür ist eine absolute Bestimmung der Pathogenkonzentration sowie geeignetes Referenzmaterial und Konsensuswerte zur Vergleichbarkeit innerhalb verschiedener Labore. Im Rahmen des Projektes „AntiMicroResist“ wird die digitale Polymerase-Kettenreaktion (dPCR) als mögliche Referenzmethode zur Charakterisierung von Referenzmaterial und der Bestimmung von Resistenzeigenschaften während der Behandlung des Patienten evaluiert. Als eine orthogonale Methode wird die Quantifizierung fluoreszenzmarkierter Viren mittels eines hochempfindlichen Durchflusszytometers durchgeführt. (A. Plauth, FB 8.3, annabell.plauth@ptb.de; A. Kummrow, FB 8.3, andreas.kummrow@ptb.de)

### **EMRP-Projekt BioSITrace abgeschlossen**

Im Rahmen des EMRP-Projektes BioSITrace hat die PTB potenzielle primäre Referenzmessverfahren untersucht, mit denen sich Zellkonzentrationen bestimmen lassen. Dabei wurden sowohl die mikroskopische Zellzählung als auch die Durchflusszytometrie eingesetzt. Als wichtige Parameter haben sich dabei die Reinheit der verwendeten Referenzmaterialien hinsichtlich des eingesetzten Messverfahrens, die Nachweisgrenzen und die erreichbare Messunsicherheit erwiesen. Die mikroskopische Zellzählung hat gegenwärtig eine größere Messunsicherheit als die Durchflusszytometrie, was hauptsächlich durch eine größere Messunsicherheit des Probenvolumens bedingt ist. Der wesentliche Vorteil der mikroskopischen Zellzählung liegt im Potenzial der morphologischen Differenzierung, wodurch sie sich auch

für weniger reine Materialien einsetzen lässt. Es gibt zwar erste technische Ansätze, mikroskopische Zelldifferenzierung in Durchflusszytometer zu integrieren, aber diese Geräte eignen sich gegenwärtig nur für die Konzentrationsbestimmung mit sekundären Referenzverfahren. Die Ergebnisse des Projektes werden in die nationale und internationale Normungsarbeit auf dem Gebiet der Zellzählung einfließen. (J. Neukammer, FB8.3, joerg.neukammer@ptb.de; A. Kummrow, andreas.kummrow@ptb.de)

### **Simulation von Lichtstreuung an nativen roten Blutzellen**

Zum ersten Mal konnten mittels numerischer Simulationsrechnungen Lichtstreuungsmessungen aus der Durchflusszytometrie quantitativ reproduziert werden. Dabei wurde der integrierte Streuwirkungsquerschnitt von natürlich geformten roten Blutzellen für verschiedene polare Öffnungswinkel und Wellenlängen im sichtbaren Bereich gemessen. Die Lichtstreuung an den nicht-kugelförmigen roten Blutzellen wurde durch eine diskrete Dipolapproximation (DDA) modelliert und wichtige Einflussgrößen wie Teilchengröße, Form, Orientierung und Dispersion des optischen Index berücksichtigt. Dies eröffnet die Möglichkeit, aus Lichtstreuungsmessungen z. B. den Mittelwert und die Streuung der Zellvolumen zu ermitteln. (H. Groß, FB 8.4, hermann.gross@ptb.de; J. Gienger, FB 8.4, jonas.gienger@ptb.de; J. Neukammer, FB 8.3, joerg.neukammer@ptb.de)

### **Brechungsindex von menschlichem Hämoglobin: Kramers-Kronig-Rechnungen**

Zur Charakterisierung von roten Blutzellen mit optischen Methoden wie der Durchflusszytometrie ist eine genaue Kenntnis des komplexen Brechungsindex (BI) der Zellen in Abhängigkeit der Wellenlänge erforderlich. Rote Blutzellen bestehen vorwiegend aus dem Blutfarbstoff Hämoglobin (Hb) und aus Wasser, dessen optische Eigenschaften bekannt sind, ebenso das Absorptionsspektrum (Imaginärteil des BI) von Hb. Literaturdaten zum Realteil des BI von wässrigen Hämoglobinlösungen sind jedoch mit großen Unsicherheiten behaftet.

Real- und Imaginärteil des BI sind nicht unabhängig, sondern durch Integraltransformationen verknüpft – die Kramers-Kronig-Beziehungen. Um den Realteil aus dem Absorptionsspektrum zu berechnen, wurde ergänzend das UV-Spektrum von Hb mathematisch modelliert. Daraus ergeben sich freie Modellparameter, die in einem linearen Optimierungsproblem an Literaturdaten angepasst werden. Dies resultiert in geringeren Unsicherheiten

für den BI. J( Gienger, FB 8.4, jonas.gienger@ptb.de; H. Groß, FB 8.4, hermann.gross@ptb.de; J. Neukammer, FB 8.3 joerg.neukammer@ptb.de)

### **Numerische Simulation von Mehrphasenströmungen**

Im Rahmen des EMRP-Projektes ENG58 zur Bestimmung der Messunsicherheit bei Mehrphasenströmungen wurden in enger Zusammenarbeit mit dem tschechischen Metrologieinstitut CMI Simulationen zur Ausbildung unterschiedlicher Strömungsmuster, die je nach Zusammensetzung und Prozessbedingungen variieren können, durchgeführt. Die Ergebnisse der Simulationen ermöglichen einen Blick in die gesamte Geometrie, auch an Stellen, die dem Experiment nicht zugänglich sind. Dadurch können mögliche Ursachen für auftretende Messungenauigkeiten dargestellt werden. (A. Fiebach, FB 8.4, andre.fiebach@ptb.de; E. Schmeyer, FB 8.4, ellen.schmeyer@ptb.de; S. Schmelter, FB 8.4, sonja.schmelter@ptb.de)

### **Surrogate Modell für die Ellipsometrie**

Die Ellipsometrie wird, unter Ausnutzung der wellenlängenabhängigen Polarisationsseigenschaften von strukturierten Oberflächenstrukturen, für die Charakterisierung in der Nanometrologie eingesetzt. Die Auswertung der indirekten Ellipsometrie-Messung erfordert normalerweise die Bestimmung der Lösung einer partiellen Differentialgleichung. Da dies sehr rechenintensiv ist, sind die Auswertungen entsprechend langwierig. Für dieses Problem wurde ein Surrogate-Modell entwickelt, das die entsprechende partielle Differentialgleichung ersetzt. Dadurch wird eine wesentlich schnellere Auswertung in der Ellipsometrie möglich. (S. Heidenreich, FB 8.4, sebastian.heidenreich@ptb.de)

### **Allgemeine Modelle für dichte aktive Suspensionen**

Aktive Suspensionen, wie Gruppen von Zellen oder dynamische Netzwerke aus Mikrotubuli-Filamenten, zeigen allgemeine dynamische Eigenschaften. In der Zusammenarbeit mit Kollegen aus der angewandten Mathematik am MIT und Courant Institute der NYU wurden verschiedene Kontinuum-Modelle verglichen und deren Phasendiagramme diskutiert. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass eine große Anzahl von Musterbildungsphänomenen in aktiven Suspensionen durch nur zwei Klassen von partiellen Differentialgleichungen höherer Ordnung beschrieben werden können. (S. Heidenreich, FB 8.4, sebastian.heidenreich@ptb.de)

### **Neue Methode zur Validierung der Mess- und Kalibrierfähigkeiten von Laboratorien**

Ein wesentliches Ziel internationaler Vergleichsmessungen (key comparisons) ist die Validierung der Mess- und Kalibrierfähigkeiten der beteiligten Laboratorien. Hierfür wurde im FB 8.4 ein neues Analyseverfahren beruhend auf dem Prinzip der Bayes'schen Hypothesenprüfung entwickelt. Das Verfahren ermöglicht die Berücksichtigung von Vorwissen und erlaubt Wahrscheinlichkeitsaussagen darüber, ob die von einem Labor angegebenen Messunsicherheiten adäquat sind. Zur einfachen Anwendung des Verfahrens sind entsprechende Software-Routinen entwickelt und auf der Webseite des FB 8.4 zur Verfügung gestellt worden. (G. Wübbeler, FB 8.4, gerd.wuebbeler@ptb.de; O. Bodnar, FB 8.4, olha.bodnar@ptb.de; C. Elster, FB 8.4, clemens.elster@ptb.de)

### **Analyse von Kalibrationskurven mit Zufallseffekten**

Die PTB-Arbeitsgruppe 8.42 hat ein neues statistisches Verfahren zur Analyse von Kalibrierkurven entwickelt, wenn zwischen unterschiedlichen Messkampagnen Zufallseffekte auftreten. Die Methode basiert auf der Bayes'schen Statistik und beinhaltet eine automatische Wahl eines geeigneten nicht-informativen Priors. Durch Anwendung der Methode kann eine vollständige Charakterisierung der Kalibration erreicht werden, was mittels einfacher „Least-squares“-Methoden nicht möglich ist. (G. Wübbeler, FB 8.4, gerd.wuebbeler@ptb.de; C. Elster, FB 8.4, clemens.elster@ptb.de)

### **Bayes'sche Schätzung von Zufallseffekten bei Meta-Analysen**

Die Meta-Analyse auf Basis sogenannter „Random effects“-Modelle hat sich als ein gut etabliertes Werkzeug in vielen Anwendungsbereichen erwiesen, z. B. bei der Kombination von Ergebnissen verschiedener klinischer Studien in der Medizin oder bei der Beurteilung der von teilnehmenden Laboratorien angegebenen Unsicherheiten in einem Ringvergleich in der Metrologie. Für eine Bayes'sche Schätzung der realisierten Zufallseffekte ist eine neue Methode entwickelt worden. Umfangreiche Simulationsergebnisse zeigen, dass das neue Verfahren Vorteile gegenüber den bisher verwendeten Techniken aufweist. (O. Bodnar, FB 8.4, olha.bodnar@ptb.de; C. Elster, FB 8.4, clemens.elster@ptb.de)

## Markov Chain Monte Carlo – Ein einführendes Beispiel

Die Auswertung von Posterior-Verteilungen Bayes'scher Analysen ist numerisch oft sehr aufwendig, aber notwendig (z. B. wenn der GUM nicht anwendbar ist). Markov-Chain-Monte-Carlo (MCMC)-Methoden sind eine flexible und vielseitige Möglichkeit, wie die beteiligten hoch-dimensionalen Integrale gelöst und damit Posterior-Verteilungen approximiert werden können. Die PTB hat eine knappe Einführung zu MCMC-Methoden entwickelt, die anhand eines einfachen Beispiels aus der Metrologie und wenigen Zeilen Programmcode den Einstieg in dieses mächtige Instrument ermöglicht. (K. Klauenberg, FB 8.4, [katy.klauenberg@ptb.de](mailto:katy.klauenberg@ptb.de); C. Elster, FB 8.4, [clemens.elster@ptb.de](mailto:clemens.elster@ptb.de))

## Die PTB als Teil der Berliner Sicherheitsforschung

Der Fachbereich 8.5 *Metrologische Informationstechnik* wurde als Mitglied in die Fakultät der Helmholtz Research School on Security Technologies (HRSST) aufgenommen.

Die Helmholtz Research School on Security Technologies (HRSST) ist ein gemeinsames Programm der Technischen Universität Berlin und des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR). Das Programm wurde 2010 ins Leben gerufen und fördert u. a. exzellente Doktoranden, die sich mit der Erforschung von Sicherheitstechnologien beschäftigen. Die HRSST möchte einen Beitrag zu Fragen der Sicherheit in wichtigen verschiedenen, sich ergänzenden Wissenschafts- und Technologiefeldern leisten. Interdisziplinäre Forschungsprojekte zielen insbesondere darauf ab, die Lücke zwischen anwendungsorientierten Sicherheitsimplementierungen und der Grundlagenforschung zu schließen.

In der Fakultät der HRSST konzentriert sich die Expertise im Bereich Sicherheitsforschung aus DLR, der Technischen Universität Berlin, der Freien Universität Berlin und der Humboldt-Universität Berlin und jetzt auch der PTB im Bereich der sicheren und vertrauenswürdigen Systemarchitekturen für das gesetzliche Messwesen. Damit wird ein Beitrag zur Integration der PTB in die Wissenschaftslandschaft Berlins geleistet. (F. Thiel, FB 8.5, [florian.thiel@ptb.de](mailto:florian.thiel@ptb.de))

## Spezifikation für die Implementierung und Prüfung von Software zur Berechnung von Messunsicherheiten

Der internationale Leitfaden „Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement“ (GUM, ISO/IEC Guide 98-3:2008) regelt die Angabe von Messunsicherheiten in der Messtechnik und findet in der Wissenschaft und der Wirtschaft intensive Anwendung. Der Leitfaden stellt eine Sammlung von „Best Practices“ dar, die teilweise beschreibend, teilweise mathematisch formalisiert und teilweise in Form von Beispielen dargelegt sind. Obwohl schon eine Vielzahl von in den letzten Jahren entstandenen Softwareprogrammen die Umsetzung des Leitfadens unterstützt, enthält der Leitfaden selbst keine konkreten Hinweise für die Implementierung und nachfolgende Validierung solcher Softwareprodukte. Bei der Implementierung und Validierung dieser Programme treten eine große Anzahl von implementierungstypischen Problemen und Fragestellungen auf, deren Lösung nicht expliziter Gegenstand des Leitfadens ist, sehr wohl aber wesentlich für eine GUM-konforme Implementierung und die Beurteilung der Softwareprogramme hinsichtlich ihrer Konformität mit dem GUM ist. Diese fehlenden implementierungsspezifischen Angaben und Regeln werden im Fachbereich 8.5 erarbeitet und in einem separaten Leitfaden „Spezifikation für die Implementierung und Prüfung von Software zur Berechnung von Messunsicherheiten“ zusammengestellt.

Dieser neue Leitfaden soll sowohl als Implementierungsanleitung für Softwarehersteller dienen als auch einen Prüfraum für Konformitätsbewertungen liefern.

Die entstehende Spezifikation wird auf der einen Seite den GUM abbilden (wo er ausreichend konkret ist), auf der anderen Seite aber den GUM interpretieren (wo er nicht ausreichend konkret ist) und ggf. den GUM erweitern, wo die Implementierbarkeit und Prüfbarkeit seiner Aussagen nicht vollständig gegeben ist. (Norbert Greif, FB 8.5, [norbert.greif@ptb.de](mailto:norbert.greif@ptb.de))

## Metrologie für die Wirtschaft

### PyDynamic – Open-Source-Software für die Analyse dynamischer Messungen

Da für dynamische Messungen grundsätzlich andere Methoden als für statische Messungen notwendig sind, stellt deren Behandlung für viele Anwender eine große Herausforderung dar. So werden bestehende mathematische und statistische Verfahren bisher fast

ausschließlich im Umfeld nationaler Metrologieinstitute angewendet. Zu diesem Zweck entwickelt die PTB-Arbeitsgruppe 8.42 zusammen mit dem National Physical Laboratory (NPL, UK) im Rahmen des EMPIR-Projekts 14SIP08 das Python-Softwarepaket PyDynamic, welches bestehende Methoden in Form von getesteter, quelloffener Software kostenfrei zur Verfügung stellt. Die erste Version von PyDynamic wurde bereits veröffentlicht und wird von mehreren Anwendern erfolgreich eingesetzt. (S. Eichstädt, FB 8.4, sascha.eichstaedt@ptb.de; N. Makarava, FB 8.4, natallia.makarava@ptb.de)

### **Bestimmung von Unsicherheiten bei Anwendung der diskreten Fouriertransformation (DFT)**

Die Fouriertransformation und ihr Gegenstück, die diskrete Fouriertransformation (DFT), sind Standardwerkzeuge in der Metrologie und Messtechnik. Obwohl nahezu alle gängigen wissenschaftlichen Softwarepakete eine Implementierung der DFT anbieten, wird die entsprechende GUM-konforme Fortpflanzung von Messunsicherheiten meistens vernachlässigt oder ignoriert. Die PTB-Arbeitsgruppe 8.42 hat zu diesem Zweck die Software GUM2DFT und ein zugehöriges Paper veröffentlicht. Die Software bietet eine effiziente Implementierung zur GUM-konformen Fortpflanzung von Messunsicherheiten für die Arbeit mit der DFT, berücksichtigt Korrelationen, verschiedene Repräsentierungen von Informationen im Frequenzbereich und nutzt die Symmetrie im Fourierspektrum reeller Signale zur speichereffizienten Implementierung aus. (S. Eichstädt, FB 8.4, sascha.eichstaedt@ptb.de; V. Wilkens, FB 1.6, volker.wilkens@ptb.de)

### **Bestimmung von Unsicherheiten bei Anwendung des Kalman Filters für die Zustandsschätzung in dynamischen Systemen**

Das Kalman Filter ist ein etabliertes Standardwerkzeug in der Schätzung von Zuständen komplexer dynamischer Systeme, wie zum Beispiel Gas- oder Stromnetzen. Voraussetzung für die Anwendung des Kalman Filters in metrologischen Anwendungen ist eine verlässliche Bestimmung der beigeordneten Unsicherheiten. Für lineare Systeme mit bekannten Modellmatrizen konnte in einer Veröffentlichung der PTB-Arbeitsgruppe gezeigt werden, dass die durch das Kalman Filter bestimmten Fehlerkovarianzmatrizen äquivalent zu einer Unsicherheitsbestimmung gemäß geltender Standards in der Metrologie sind. Für unsicher bekannte oder nichtlineare Systeme konnte dagegen gezeigt werden, dass diese Äquivalenz nicht mehr gilt. Für lineare unsicher bekannte Systeme wird stattdessen die Monte-Carlo-Methode und für nichtlineare Sys-

teme eine Anwendung Bayes'scher Schätzverfahren empfohlen. (S. Eichstädt, FB 8.4, sascha.eichstaedt@ptb.de; N. Makarava, FB 8.4, natallia.makarava@ptb.de; C. Elster, FB 8.4, clemens.elster@ptb.de)

### **Erfolgreicher Abschluss des EMRP-Projekts IND52 „Multidimensionale Reflektometrie für die Industrie“**

Im Rahmen des von neun europäischen Partnern durchgeführten EMRP-Projektes IND52 wurden Verfahren zur verbesserten messtechnischen Charakterisierung der visuellen optischen Eigenschaften von Oberflächen entwickelt. Im FB 8.4 wurden hierfür virtuelle Experimente zur genaueren Charakterisierung der komplexen optischen Messverfahren erstellt und effiziente Aufnahmestrategien zur Bestimmung der hochdimensionalen bidirektionalen Reflektanzverteilungsfunktion (BRDF) erarbeitet. Darüber hinaus wurden Methoden für eine zuverlässige Berechnung von Messunsicherheiten für Farbkoordinaten entwickelt. (G. Wübbeler, FB 8.4, gerd.wuebbeler@ptb.de; F. Schmähling, franko.schmaehling@ptb.de; C. Elster, FB 8.4, clemens.elster@ptb.de)

### **Neues Industrieprojekt zur Ermittlung des Gesundheitszustands von Li-Ionenbatterien**

Im Rahmen der Elektromobilität ist die schnelle Bestimmung des Gesundheitszustands der Batterien von hoher Bedeutung, insbesondere zur genauen Angabe der verbleibenden Reichweite einer Akkuladung. In einer Kooperation mit Volkswagen wird in den beiden Fachbereichen *Physikalische Chemie* und *Mathematische Modellierung und Datenanalyse* gemeinsam eine statistische Methode zur Bestimmung des Gesundheitszustands weiterentwickelt und erprobt. (G. Wübbeler, FB 8.4, gerd.wuebbeler@ptb.de; F. Schmähling, FB 8.4, franko.schmaehling@ptb.de; J. Heine, FB 3.4 u. FB 8.4, jessica.heine@ptb.de; S. Seitz, FB 3.4, steffen.seitz@ptb.de; C. Elster, FB 8.4, clemens.elster@ptb.de)

### **Verbesserte Rekonstruktion von Farbspektren**

Die spektrale Farbmessung stellt eine grundlegende Anwendung in vielen Bereichen der Wissenschaft und Industrie dar. Multispektral messende Zeilenkameras bieten hierbei die Möglichkeit, mithilfe eines geeigneten Algorithmus, das komplette Reflexionsspektrum einer zu messenden Oberfläche in Echtzeit aufzunehmen. Im Rahmen des MNPQ-Projekts „Rekonstruktion orts aufgelöster Farbspektren“ wurde gemeinsam mit der Firma Chromasens GmbH ein Verfahren für multispektral messende Zeilenkameras entwickelt, das mithilfe von spektralen Vorinformationen Farbspektren effizient

und mit hoher Genauigkeit rekonstruiert. In einer Simulationsstudie konnte gezeigt werden, dass der verfolgte Ansatz bessere Ergebnisse liefert als herkömmliche empirische Verfahren. (M. Dierl, FB 8.4, marcel.dierl@ptb.de)

### **Neues europäisches Forschungsprojekt zur Formmessung von Asphären und Freiformflächen gestartet**

Im EMPIR-Forschungsvorhaben „Reference algorithms and metrology on aspherical and freeform optical lenses“ werden zusammen mit dem Projektkoordinator LNE und 17 weiteren Partnern neue Referenzalgorithmen und Messverfahren zur Formmessung von Asphären und Freiformflächen entwickelt.

Innerhalb der PTB wird das Forschungsprojekt gemeinsam von den Fachbereichen *Bild- und Wellenoptik* und *Mathematische Modellierung und Datenanalyse* bearbeitet. Schwerpunkte in der PTB sind die Entwicklung von metrologischen Referenzflächen, die die Vergleichbarkeit von Formmessungen verschiedener Messgeräte erleichtern werden, die Auswertung von Vergleichsmessungen zwischen den Projektpartnern sowie die Weiterentwicklung und Unsicherheitsanalyse des Tilted-Wave-Interferometers, das in der PTB für die Formmessung von Asphären und Freiformflächen eingesetzt wird. (M. Schulz, FB 4.2, michael.schulz@ptb.de; C. Elster, FB 8.4, clemens.elster@ptb.de)

### **Abschluss des Promotionsprojekts „Sichere Messsysteme im gesetzlichen Messwesen“**

Messgeräte sind heutzutage oft leistungsstarke Computer, für die Sicherheitsstandards immer bedeutender werden. Im Rahmen des gesetzlichen Messwesens ist dies sogar zwingend vorgeschrieben. Die zusammen mit der TU Berlin entwickelte Referenzarchitektur gewährleistet die Kapselung der Kontrollmodule über einen Mikrokern. Gleichzeitig kann die Vielseitigkeit und Benutzerfreundlichkeit von Standard-Betriebssystemen für die reine Darstellung der Messwerte weiterhin genutzt werden.

Die neue, konfigurierbare Software-Referenzarchitektur kapselt die eigentlichen Betriebssysteme in Module, virtuelle Maschinen (VM) genannt. Die Betriebssysteme können weiterhin ihre üblichen Programme und Treiber laden, jedoch nur über den Mikrokern miteinander kommunizieren und auf Hardware zugreifen. Auf diese Weise kann die gut verifizierbare, weil relativ kleine Software des Mikrokerns eine Manipulation der Daten erkennen.

Die Systemarchitektur basiert auf einem modularen Design, bei dem die einzelnen virtuellen Maschinen Forderungen der Messgeräte-Richtlinie der Europäischen Union (MID) und des WELMEC 7.2 Software Guides berücksichtigen. Sie ist für alle verteilten Sensoren mit Mikrokern von Interesse, deren Daten über das Internet weitergeleitet und auf Servern weiterverarbeitet werden müssen. Unterliegen die Messgeräte dem gesetzlichen Messwesen, so können mittels des Konzeptes rechtlich relevante von rechtlich nicht-relevanten Software-Bereichen getrennt werden. Zudem wurde eine platzsparende Dateisystemstruktur entwickelt, um die Datenintegrität zu prüfen. Diese kann vom Hersteller für die Fernwartung wie auch von der Marktüberwachung zur Fernbefundprüfung genutzt werden und wurde als Patent angemeldet. (D. Peters, FB 8.5, daniel.peters@ptb.de)

### **Sichere Cloud-Referenzarchitektur im gesetzlichen Messwesen**

Das Ziel dieses Projektes ist, eine sichere Cloud-Referenzarchitektur zu erstellen, die verschiedene Anwendungsfälle für das gesetzliche Messwesen abdeckt. Im Rahmen von Technologietransferprojekten können Hersteller ihre Messgeräte im gesetzlichen Messwesen zusammen mit der PTB an dieser Referenzarchitektur ausrichten. Dies verschlankt den Zulassungsprozess und sichert die Akzeptanz der Geräte durch die Marktaufsichtsbehörden, da entsprechend einfache Prüfverfahren und eine Risikoanalyse Bestandteil der Architektur sind. Durch diese Vorgehensweise wird die Digitalisierung der Wirtschaft in einem stark regulierten Bereich durch die PTB gefördert. Die in diesem Projekt erstellten Modelle profitieren von einem modularen Design, bei dem die Forderung der Messgeräte-Richtlinie der Europäischen Union (MID) durch die Anwendung des WELMEC 7.2 Software Guide umgesetzt werden.

Zurzeit wird eine moderne Mikroservice-Architektur entwickelt, um den modularen und skalierbaren Charakter der Cloud-Referenzarchitektur gerecht zu werden. Die Vorteile gegenüber herkömmlichen monolithischen Softwarearchitekturen ergeben sich aus der gesteigerten Flexibilität und Erweiterbarkeit für die Hersteller. Diese können ohne große Mühen beliebig skaliert und somit an den jeweiligen Bedarf angepasst werden. Durch die Abschottung einzelner Services und die Fokussierung auf die notwendige Funktionalität wird die Sicherheit bereits in der Architektur verankert. Zusätzlich wird durch die Forschung an Fully-Homomorphic-Encryption

(FHE) an der Absicherung virtueller Maschinen untereinander gearbeitet bzw. das System vor einer Insider-Attacke geschützt. FHE ermöglicht eine verschlüsselte Datenverarbeitung, ohne Kenntnis von den eigentlichen Daten haben zu müssen. Durch diesen Ansatz werden zentrale Probleme des Datenschutzes und Umsetzungshemmnisse im gesetzlichen Messwesen gelöst. Die Architektur soll als Rahmenwerk dienen, um alle messrechtlich relevanten Funktionen in der Cloud sicher durchzuführen. (A. Oppermann, FB 8.5, alexander.oppermann@ptb.de)

### **Schutz eichrechtlich relevanter Software auf Messgeräten mit Betriebssystem**

Viele Messgeräte enthalten heute Komponenten, die mit einem Standard-Betriebssystem ausgestattet sind, um den Aufwand für den Hersteller zur Verwaltung der Hardware zu verringern und dem Benutzer die Bedienbarkeit zu erleichtern.

In einer Untergruppe der AG 8.51, die sich mit der eichrechtlich relevanten Konfiguration von Standard-Betriebssystemen beschäftigt, wurde im letzten Jahr ein Framework mit grundlegenden Anforderungen an die Konfiguration des Betriebssystems sowie einer daraus abgeleiteten Prüfanweisung und Herstellerempfehlung entwickelt. Diese ermöglichen es, die Konfiguration von Standard-Betriebssystemen (Windows, Linux) während einer Konformitätsbewertung systematisch zu überprüfen, um den gesetzlich geforderten Schutz des Messgerätes auf Betriebssystemebene zu erreichen. Zukünftig sollen auch Werkzeuge zur automatischen Prüfung von Konfigurationen überarbeitet und erweitert werden, um den Bearbeitungsaufwand zu verringern und damit den Prüfvorgang zu beschleunigen.

Diese Prüfanweisungen werden im Folgenden in einer PTB-Anforderung veröffentlicht werden. (R. Meyer, FB 8.5, reinhard.meyer@ptb.de)

### **Testumgebung für Messunsicherheits-Software**

Die PTB hat sich der korrekten Anwendung des „Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement“ (GUM) verpflichtet. Daher wird für die Berechnung von Messunsicherheiten in den Laboratorien der PTB validierte Software eingesetzt. Zu diesem Zweck wurden vom Fachbereich 8.5 eine Testumgebung und eine Testdatenbank geschaffen, die die vollständige, detaillierte, nachvollziehbare und bei Bedarf auch vergleichende Validierung von entsprechenden Softwareprogrammen erlauben. Die Validierung umfasst dabei u. a. die folgenden Aspekte:

- Welche Abschnitte, Algorithmen, Berechnungsvarianten oder Ansätze des GUM sind in der Software umgesetzt?
- Sind die Algorithmen korrekt implementiert?
- Sind Zusatzanforderungen des GUM korrekt implementiert?
- Werden Plausibilitätsprüfungen durchgeführt?

Testumgebung und Testdatenbank sind so gestaltet, dass sie mit geringem Aufwand an neue, zu prüfende kommerzielle Softwareprogramme angepasst werden können. Bisher wurden ca. ein Dutzend verschiedene, hauptsächlich kommerzielle GUM-Programme unterschiedlicher Hersteller einer Validierung unterzogen.

Die Testumgebung hat sich insbesondere für kommerzielle Softwareprodukte bewährt. Grundsätzlich ist die Einsatzfähigkeit auch bei Java- und webbasierten Programmen erwiesen.

Eine ausführliche Beschreibung der Testumgebung und der Testdatenbank liegt in Form des PTB-Berichts IT-19 vor. (Heike Schrepf, FB 8.5, heike.schrepf@ptb.de)

## **Metrologie für die Gesellschaft**

### **EMPIR-Projekt zur Verbesserung von Diagnostik und Therapiekontrolle neurodegenerativer Erkrankungen**

Die Expertise nationaler Metrologieinstitute wird im EMPIR-Projekt NeuroMet mit klinischen und akademischen Forschungsansätzen gebündelt, um die metrologischen Barrieren bei der Diagnostik und Therapie neurodegenerativer Erkrankungen, v. a. der Alzheimer-Demenz, zu überwinden. Das Projekt trägt zu einer metrologischen Infrastruktur bei, die eine Frühdiagnose von Demenz ermöglichen soll und den Erfolg therapeutischer klinischer Studien verfolgen kann. In der PTB wird in Kooperation mit der Charité ein Ultrahochfeld-MR-Protokoll entwickelt und bei Patienten mit Alzheimer-Erkrankung und leichter kognitiver Beeinträchtigung sowie gesunden Kontrollpersonen angewendet, um Biomarker zu identifizieren und zu quantifizieren. Die hohe Empfindlichkeit und spektrale Auflösung bei 7 T erlaubt dabei eine Volumetrie des Gehirns im Submillimeterbereich und die quantitative Bestimmung von zahlreichen Metaboliten in ausgewählten Gehirnregionen. (F. Schubert, FB 8.1, Florian.schubert@ptb.de)

## **Neuronale Plastizität, induziert durch transkraniale Gleichstromstimulation**

Nichtinvasive elektrische Gehirnstimulation (transcranial direct current stimulation, tDCS) kann bei älteren Menschen das Gedächtnis verbessern. Die Effekte der Stimulation auf Neurotransmitter und funktionelle Gehirnnetzwerke werden im Kooperationsprojekt TrainStim mit der AG Kognitive Neurologie der Charité untersucht. Wissenschaftler der AG *In-vivo-MRT* der PTB messen dafür Transmitterkonzentrationen und funktionelle MR-Tomografie in Abhängigkeit von der Stimulation und im Vergleich zur Scheinstimulation. Es wurde erstmalig in älteren Versuchspersonen gezeigt, dass tDCS zu signifikant verringerten Konzentrationen des Neurotransmitters GABA führt. (F. Schubert, FB 8.1, florian.schubert@ptb.de)

## **Verbesserung der Empfindlichkeit der MR-Spektroskopie**

Die Möglichkeit, das Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) in MR-Spektren durch Signal-Nachverarbeitung zu erhöhen, stößt bei stark verrauschten Spektren, z. B. aus sehr kleinen Volumenelementen im Gehirn, an ihre Grenzen. Die neuartige Kombination zweier Techniken – der nicht-wasserunterdrückten Metabolite-Cycling-Spektroskopie (MC) und der SPECIAL-Lokalisation – in „MC-SPECIAL“ erlaubt es, das SNR durch Post-hoc-Korrektur auch bei solchen Spektren zu optimieren. Der MC-Teil liefert dabei die Korrekturmöglichkeit, SPECIAL die kurze Echozeit für die Bestimmung möglichst vieler Metaboliten. Durch die neue Methode kann die räumliche Spezifität von MR-spektroskopischen Messungen und die robuste Quantifizierung von Metaboliten erhöht werden. (A. Fillmer, FB 8.1, ariane.fillmer@ptb.de)

## **Standardisierung von Messergebnissen für die Kardio-MRT**

Eine internationale Kollaboration mit Mitgliedern aus der Wirtschaft, medizinischen Forschungseinrichtungen und nationalen Metrologie-Instituten wurde 2015 gegründet, um ein Qualitätssicherungssystem zu entwickeln, das korrekte T1- und T2-Relaxationszeiten in der MR-Bildgebung sicherstellen soll. Dazu wurde ein MR-Phantom entwickelt, das die physiologisch relevanten Bereiche für beide Relaxationszeiten in der Herzbildgebung abdeckt. Kopien dieses Phantoms werden in 16 Mitgliedsinstituten des Konsortiums im Zweiwochen-Rhythmus mit unterschiedlichen Verfahren und MR-Scannern vermessen. Während die beteiligten Unikliniken ihre schnellen, aber wenig genauen Standard-Sequenzen für die T1/T2-Bildgebung einsetzen, be-

steht der Beitrag der PTB in zeitlich deutlich aufwendigeren Präzisionsmessungen. (R. Brühl, FB 8.1, ruediger.bruehl@ptb.de)

## **Europäische Zusammenarbeit bei messtechnischer Rückführung von Augentonomern**

Die Wahrung der Messgüte von Augentonomern durch Rückführung auf nationale Normale oder klinisch geprüfte Referenzmessgeräte ist entscheidend für die korrekte Diagnose und medizinische Verlaufskontrolle von Augenkrankheiten durch Messung des Augeninnendrucks. Da nicht alle europäischen NMI das Know-how und die erforderlichen Kapazitäten haben, diese metrologische Aufgabe alleine zu bewältigen, haben sich Vertreter verschiedener europäischer Metrologieinstitute (CMI, BEV, GUM, SMU, TÜBITAK, PTB) zusammengefunden, um in einem Pilotprojekt zu erkunden, ob eine Zentralisierung dieser Aufgabe zunächst auf mitteleuropäischer Ebene möglich ist. Zukünftig soll am CMI in der Tschechischen Republik ein Kompetenzzentrum für diese Aufgaben aufgebaut werden. Der PTB mit ihrer langjährigen Erfahrung auf diesem Sektor kommt dabei eine wichtige Beraterfunktion zu. (T. Schwentek, FB 8.1, thomas.schwentek@ptb.de)

## **Entwicklung und Evaluation eines „Thermal Dose“-basierten Sicherheitskonzeptes für pTx-Spulen**

Die thermische Dosis ist ein gewebespezifisches Maß, welches das Risiko einer thermisch bedingten Gewebeschädigung beschreibt. Zukünftig wird neben der maximalen lokalen spezifischen Absorptionsrate  $psAR_{10g}$  alternativ auch die thermische Dosis als Maß für die sicherheitstechnische Beurteilung von HF-Sendespulen im MRT herangezogen werden. Es wurde ein Verfahren entwickelt, um für mehrkanalige MR-Sendespulen die maximale Gewebetemperatur zu bestimmen. Mithilfe eines einfachen Modells kann die maximale gewebespezifische Temperatur im Verlauf der Messung und damit die akkumulierte thermische Dosis bestimmt werden. (F. Seifert, FB 8.1, frank.seifert@ptb.de)

## **Dritte Runde für IMAGEN**

Die 2008 begonnene europäische IMAGEN-Studie wird fortgeführt, und die ca. 2000 jetzt 21-jährigen Probanden werden in den kommenden beiden Jahren zum dritten Mal an einem umfangreichen Messprogramm teilnehmen. Alle acht beteiligten MR-Zentren aus Großbritannien, Irland, Frankreich und Deutschland nehmen weiterhin teil, wobei an drei Instituten neuinstallierte MR-Scanner zum Einsatz kommen. Mit dem Ziel der bestmöglichen

Vergleichbarkeit zu vorherigen Messungen wird das MR-Protokoll beibehalten, aber um ein inzwischen neuentwickelte Diffusionsmessverfahren (NODDI) erweitert. IMAGEN ist ein Projekt der psychiatrischen Grundlagenforschung, die Rolle der PTB besteht in der Definition und Standardisierung des MR-Messprogramms. (R. Brühl, FB 8.1, ruediger.bruehl@ptb.de)

### **Klinische Studie zur fluoreszenzgestützten intraoperativen Wächterlymphknotendetektion abgeschlossen**

Im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Projektes „FluoroCam“ hat die Arbeitsgruppe *Medizinisch-optische Bildgebung* gemeinsam mit der Klinik für Gynäkologie des Virchow-Klinikums der Charité Berlin ein an der PTB entwickeltes Verfahren zur intraoperativen Erkennung von Wächterlymphknoten erprobt. Bei diesem Verfahren werden Lymphknoten in der Umgebung von Tumoren mithilfe des fluoreszierenden Kontrastmittels Indocyaningrün sichtbar gemacht. Das von der PTB aufgebaute handgeführte Kamerasystem ermöglicht dem Operateur, die Lymphknoten zu erkennen und so deren operative Entnahme zu vereinfachen. Im Rahmen der klinischen Studie wurden insgesamt 16 Patientinnen mit den Krebsarten Vulvakarzinom, Zervixkarzinom, Endometriumkarzinom und Ovarialkarzinom erfolgreich untersucht. (D. Grosenick, FB 8.3, dirk.grosenick@ptb.de)

### **Europäisches Doktorandennetzwerk „BitMap“ gestartet**

Im Rahmen des Europäischen Doktorandennetzwerks „Brain injury and trauma monitoring using advanced photonics“, BitMap, einem Marie Skłodowska-Curie Innovative Training Network (ITN), sollen insgesamt 15 Doktoranden in einem internationalen und multidisziplinären Umfeld ausgebildet werden. Dem von der Universität Birmingham geführten Konsortium gehören auf dem Gebiet führende wissenschaftliche und klinische Partner sowie mittelständische Unternehmen aus 6 europäischen Ländern an. Ziel ist die Entwicklung von nicht-invasiven optischen Geräten und Verfahren, die wesentliche Informationen über den Zustand des Gehirns in der neurologischen Intensivmedizin und Überwachung liefern können, insbesondere nach Hirnverletzungen. Der „Early Stage Researcher“ in der PTB wird an Methoden zur zeitaufgelösten zerebralen Gewebeermetrie und ihrer Charakterisierung mittels Phantomen arbeiten. (H. Wabnitz, FB 8.3, heidrun.wabnitz@ptb.de)

### **Kontrolle konkurrierender Muster in generischen Modellen**

Regelmäßige Strukturen treten in Natur und Technik auch fern vom thermodynamischen Gleichgewicht auf und werden oft durch vereinfachte, generische Modelle beschrieben. In Zusammenarbeit mit dem Weierstraß-Institut für angewandte Analysis und Stochastik (WIAS) wurde an der PTB ein solches Modell untersucht. Von Interesse ist insbesondere die Kontrolle globaler Muster durch kleine, lokale Störungen. (T. Niedermayer, FB 8.4, thomas.niedermayer@ptb.de)

### **Chimären in Feldern von Zilien**

Zilien sind haarförmige Ausstülpungen biologischer Zellen und dienen zur Bewegung der umgebenden Flüssigkeit, z. B. um die Atemwege zu reinigen. Da Zilien in Reihen oder Feldern angeordnet sind, wechselwirken sie mittels der umgebenden Flüssigkeit und zeigen interessante Ordnungseffekte. Theoretische Untersuchungen an der PTB deuten darauf hin, dass dabei entgegen gängiger Theorien, die von einer global geordneten Phase ausgehen, eine sogenannte Chimäre auftritt. Dieses theoretische Konzept beschreibt die Koexistenz von Ordnung und Unordnung in ausgedehnten Systemen. (T. Niedermayer, FB 8.4, thomas.niedermayer@ptb.de)

### **Defibrillation durch kollektive Anregung des Herzwebes**

Beim Kammerflimmern breiten sich elektrische Erregungswellen chaotisch im Herzmuskel aus. Die bisher einzige wirksame Therapie dagegen ist die Defibrillation durch einen starken Elektroschock, der jedoch das Herzgewebe schädigen kann. Vor Kurzem wurde in vivo gezeigt, dass die sukzessive Applikation mehrerer schwacher Pulse zur schonenden Defibrillation genutzt werden kann. An der PTB wurde durch numerische Simulationen erforscht, wie die schwachen Pulse kollektiv das Herzgewebe anregen. (P. Buran, FB 8.4, pavel.buran@ptb.de; T. Niedermayer, FB 8.4, thomas.niedermayer@ptb.de)

### **Dreidimensionales Modell für durch Mikrofibröse induzierte irreguläre elektrische Dynamik in Herzmuskelgewebe**

In Kooperation mit Kollegen der UPC Barcelona und der Universität Juiz de Fora (Brasilien) konnte der Einfluß der Schichtdicke des Herzgewebes auf das Auftreten irregulärer elektrischer Dynamik (Arrhythmien) in einem diskreten, zellbasierten Modell mit heterogen verteilten interzellulären Kopplungen demonstriert werden. Die dritte Dimension kann dabei je nach physiologischen Bedingungen

zu Anstieg oder Abnahme der Häufigkeit von Arrhythmien führen. Zudem wurde der bereits in zwei Dimensionen gefundene Zusammenhang zwischen dem Auftreten von heterogenitätsinduzierten Arrhythmien und der Perkolationschwelle bestätigt. Daraus folgt, dass elektrische Propagation in drei Dimensionen deutlich robuster gegenüber Defekten in der Kopplung zwischen Zellen ist als in zwei Dimensionen. (M. Bär, FB 8.4, markus.baer@ptb.de)

## **PTB-Seminar zur Berechnung der Messunsicherheit in der Praxis**

Am 17. und 18. März 2016 fand in der PTB-Berlin zum fünften Mal das Helmholtz-Seminar „Berechnung der Messunsicherheit – Empfehlungen für die Praxis“ statt. Die Veranstaltung wendet sich an Mitarbeiter in Prüf- und Kalibrierlaboratorien und wird gemeinsam mit der BAM und dem DAkkS durchgeführt. 126 Besucher nahmen teil. Im März 2018 ist die nächste Veranstaltung geplant. (S. Mieke, FB 8.4, stephan.mieke@ptb.de; K. Klauenberg, FB 8.4, katy.klauenberg@ptb.de)

## **Einrichtung des Arbeitskreises „Statistik für das Mess- und Eichrecht“**

Zur Unterstützung des gesetzlichen Messwesens bei statistischen Fragestellungen wurde der PTB-Arbeitskreis (AK) *Statistik für das Mess- und Eichrecht* eingerichtet. Als erste Aufgabe hat der AK die Entwicklung von Stichprobenplänen für Verbrauchsmessgeräte veranlasst, um den §35 der neuen Mess- und Eichverordnung umzusetzen. Vertreter von Eichbehörden, Prüfstellen, Konformitätsbewertungsstellen, Versorgungsunternehmen sowie Verbänden der Verbrauchsgüter Gas, Wasser, Wärme und Elektrizität trafen sich im Juni mit PTB Fachexperten, um über neue Stichprobenpläne, die erhöhte Anforderungen des §35 erfüllen, zu diskutieren. Diese Stichprobenpläne werden derzeit noch effizienter und gleichzeitig sicherer gestaltet, um die Belastung für Gerätebetreiber zu senken und den Verbraucherschutz noch stärker zu gewährleisten. (K. Klauenberg, FB 8.4, katy.klauenberg@ptb.de)

## **Stichprobenpläne zur Überwachung von Verbrauchsmessgeräten**

Der § 35 des neuen Mess- und Eichgesetzes regelt die Verlängerung der Eichfrist von Verbrauchsmessgeräten aufgrund von Stichprobenverfahren. Das Stichprobenverfahren soll neuerdings sicherstellen, dass mindestens 95 % der Messgeräte richtig funktionieren, und dies soll für den gesamten Verlängerungszeitraum gelten (statt bisher nur zum Prüfzeitpunkt). Für diese höheren Anforderungen hat die PTB-Arbeitsgruppe 8.42 ein neues Verfah-

ren entwickelt, das die Bestimmung solcher Stichprobenpläne praxisnah und ähnlich wie bisher ermöglicht. (K. Klauenberg, FB 8.4, katy.klauenberg@ptb.de; C. Elster, FB 8.4, clemens.elster@ptb.de)

## **Quantifizierung der Bildqualität am CT mittels „task specific quality assessment“**

In einem gemeinsamen Forschungsvorhaben der beiden Abteilungen *Ionisierende Strahlung* und *Medizinphysik* soll die Qualität von Bildern am CT quantifiziert werden. Ziel ist es, eine bessere Beurteilung und Vergleichbarkeit unterschiedlicher Geräte und Rekonstruktionsverfahren zu ermöglichen. Basis für die Beurteilung sind sogenannte „model observer“, die eine automatische Klassifikation von Bildern durchführen. In einem ersten Schritt des Vorhabens werden Unsicherheitsanalysen für die Güte dieser Verfahren durchgeführt und mittels realer Messungen erprobt. (M. Anton, FB 6.2 mathias.anton@ptb.de; M. Reginatto, FB 6.4, marcel.reginatto@ptb.de; C. Elster, FB 8.4, clemens.elster@ptb.de)

## **Neues statistisches Verfahren für die Strahlenschutzdosimetrie**

Die beiden Abteilungen *Ionisierende Strahlung* und *Medizinphysik* entwickeln gemeinsam neue statistische Verfahren zur Analyse von Strahlungsmessungen. Bei der Entwicklung werden Techniken der Bayes'schen Statistik eingesetzt, mit denen die Information aus einer vorangegangenen Messung der Hintergrundstrahlung besser berücksichtigt werden kann. In einem ersten Ergebnis wurde ein Verfahren erarbeitet, das sensitiver ist als die in den aktuellen Normen empfohlenen Analysemethoden. (O. Bodnar, FB 8.4, olha.bodnar@ptb.de; R. Behrens, FB 6.3, rolf.behrens@ptb.de; C. Elster, FB 8.4 clemens.elster@ptb.de)

## **Neue Herausforderungen für die Arbeitsgruppe 8.51 Metrologische Software**

Am 30.9.2016 wurde der langjährige Leiter der Arbeitsgruppe 8.51 *Metrologische Software* Ulrich Grottker in den wohlverdienten Ruhestand verabschiedet.

Die Arbeitsgruppe steht nun gleich vor mehreren Herausforderungen:

Zum ersten ist für die Arbeitsgruppen der PTB die Baumusterprüfungen im Rahmen von Konformitätsbewertungen im gesetzlichen Messwesen durchzuführen und aufgrund der wachsenden Nachfrage auszubauen. Dazu wird eine kurzfristige Verfügbarkeit eines Softwareansprechpartners für laufende Herstellergespräche sichergestellt. Ähnlich wie in

anderen Arbeitsgruppen mit Kontakt zu externen Kunden wird es zukünftig eine Funktions-E-Mail-Adresse (softwaretest@ptb.de) sowie einen zentralen Ansprechpartner der Arbeitsgruppe 8.51 für eingehende Prüfaufträge geben.

Zum zweiten stehen Anpassungen der einschlägigen Anforderungsdokumente an, um sie mit dem Stand der Technik mitzuführen. Dazu gehören die Revision der OIML D31 sowie weitere Anpassungen des WELMEC Guides 7.2 Software. Letzterer soll dabei durch Umstrukturierungen und Ergänzungen technologieoffener und flexibler werden. Gleichzeitig werden neben einem Anforderungsdokument für Messgeräte mit Betriebssystem neue Leitfäden für Softwareprüfer im gesetzlichen Messwesen erstellt. Diese sollen sich zunächst mit der Interpretation der nationalen Anforderungen an Softwareaktualisierungen und mit Anforderungen an die Softwaretrennung beschäftigen.

Zum dritten liefert die Arbeitsgruppe vorlauforientiert Antworten für wesentliche Innovationen in dem sich schnell entwickelnden Bereich der Informations- und Kommunikationstechnologie im gesetzlichen Messwesen. Dabei wird die Arbeitsgruppe sowohl an Ringvergleichen und der Weiterentwicklung bestehender Methoden beteiligt sein als auch an der Untersuchung neuer Methoden mitwirken und durch ihre Gremienarbeit auch auf eine Standardisierung der erarbeiteten Verfahren hinwirken. Abschließend lässt sich festhalten, dass die Arbeitsgruppe für die anstehenden Herausforderungen gut aufgestellt ist. (M. Esche, FB 8.5, marco.esche@ptb.de)

### **Softwareaktualisierung auf Messgeräten im Rahmen des neuen Mess- und Eichgesetzes**

Mit dem Inkrafttreten des Mess- und Eichgesetzes (MessEG) wurde erstmalig die gesetzliche Grundlage geschaffen, bei Messgeräten und Messsystemen Software nach dem Inverkehrbringen der Messgeräte ohne Siegelbruch und ohne vorzeitiges Erlöschen der Eichgültigkeit zu aktualisieren. Hierbei sind einerseits formale und andererseits technische Randbedingungen und Anforderungen des Gesetzes einzuhalten.

Technische Anforderungen an diese Art von Messgeräten werden zurzeit in der Arbeitsgruppe 8.51 *Metrologische Software* entwickelt und ausformuliert und im Anschluss in Form einer PTB-Anforderung dem Regelermittlungsausschuss zur Ermittlung vorgelegt. Europäisch harmonisierte Anforderungen nach dem WELMEC Guide 7.2 „Software“ werden

mit den nationalen Anforderungen verglichen und fließen bei Übereinstimmung mit ein.

Der mit dem Mess- und Eichgesetz neu eingeführte Begriff „zugehörige Software, die neben der Messfunktion weitere Funktionen erfüllt“ bezieht sich auf das Vorhandensein einer Softwaretrennung innerhalb der Messgeräte: Der Softwarebereich, der rechtlich relevante Funktionen ausführt, muss durch Schutzmechanismen gekapselt sein. Ist dies der Fall und wurde dies auch explizit durch die Konformitätsbewertungsstelle bestätigt, kann sonstige zugehörige Software auch ohne Genehmigung einer zuständigen Stelle aktualisiert werden. Auch hier werden seitens der Arbeitsgruppe 8.51, im Rahmen von PTB-Anforderungen, Anforderungen an Messgeräte mit Softwaretrennung erarbeitet. (M. Elfroth, FB 8.5, marco.elfroth@ptb.de)

### **Erste Erfahrungen mit der Zulassung neuer Spielgeräte-Bauarten nach TR 5.0**

Die Spielverordnung (SpielV) regelt die Voraussetzungen für die Zulassung von Geldspielgeräten. Durch eine Novellierung der SpielV Ende 2014 wurden vom Gesetzgeber neue Anforderungen definiert, um den Spielerschutz und die Sicherheit von Geldspielgeräten weiter zu stärken. Hierzu zählt unter anderem die Verwendung eines Identifikationsmittels zur Freischaltung von Geldspielgeräten. Dieser Bericht beschreibt die ersten Erfahrungen der PTB in der Zulassung bzgl. dieser neuen Maßnahme.

Der Gesetzgeber hat für das Identifikationsmittel keine konkrete Form oder Ausprägung vorgegeben, sondern eine Reihe von Kriterien festgelegt, um Technologieoffenheit zu gewährleisten. Die Kriterien sind im §13 Nr. 10 SpielV festgelegt und umfassen folgende Forderungen:

- Der Spielbetrieb ist nur unter ständiger Verwendung eines Identifikationsmittels möglich.
- Das Identifikationsmittel muss gültig, gerätegebunden und personenungebunden sein.
- Die Gültigkeit muss vor der Aufnahme des Spielbetriebes geprüft werden.
- Im Spielbetrieb dürfen keine Daten auf dem Identifikationsmittel gespeichert werden.

Der Spieler kann unter Verwendung eines Identifikationsmittels den Spielbetrieb freischalten. Hierzu werden vom Gerät die Gültigkeit sowie die Geräte-

gebundenheit des Identifikationsmittels überprüft. Ferner darf es keine Rückschlüsse auf den Spieler zulassen. Sind diese Bedingungen erfüllt, wechselt das Gerät in den Spielbetrieb. Zur Verhinderung eines „Spielertrackings“ dürfen im Spielbetrieb keine Daten auf dem Identifikationsmittel gespeichert werden bzw. keinerlei Daten dem Spieler zugeordnet werden. Wird das Identifikationsmittel entfernt, muss der Spielbetrieb beendet werden, und das Geldspielgerät kehrt in den Pause-Zustand zurück.

Hersteller von Geldspielgeräten treten mit neuen Lösungen an die PTB heran. Die PTB unterstützt innovative Ansätze, die nachweislich die gesetzlichen Anforderungen erfüllen. (G. Thomas, FB 8.5, gervin.thomas@ptb.de)

### Internationale Angelegenheiten

#### 9<sup>th</sup> International Workshop on Analysis of Dynamic Measurements (DYNAMIC2016)

Im Rahmen der Projekte EURAMET TC-1078 und MATHMET Dynamic organisiert die PTB Arbeitsgruppe 8.42 zusammen mit dem National Physical Laboratory (NPL), Großbritannien, und dem Laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE), Frankreich, seit 10 Jahren eine Workshopreihe, welche Wissenschaftler nationaler Metrologieinstitute, Universitäten und Industrie zusammenbringt, die auf dem Gebiet dynamischer Messungen arbeiten. Der 9. Workshop dieser Reihe wurde von der PTB Berlin erfolgreich mit über 40 Teilnehmern aus 17 Nationen ausgetragen. (S. Eichstädt, FB 8.4, sascha.eichstaedt@ptb.de)

#### Kooperation mit COOMET

Im Rahmen einer Kooperation mit COOMET wurde der Vortrag „Ermittlung der Unsicherheit bei der Anpassung von Fundamentalkonstanten“ beim 13. internationalen wissenschaftlichen und technischen Seminar „Uncertainty of measurement: scientific, applied, regulatory and methodical aspects (UM-2016)“ gehalten. Ferner wurde beim parallel stattfindenden „Ausbildungsseminar für junge Metrologen COOMET: Schätzungen der Genauigkeit und der Unsicherheit bei der Messung“ der Beitrag „Bewertung des Referenz Prior und seine Anwendung für Bayes'sche Schätzung vom Generalized Marginal Random Effects Model“ vorgestellt. (O. Bodnar, FB 8.4, olha.bodnar@ptb.de)

#### MATHMET 2016 - International Workshop on Mathematics and Statistics for Metrology

Nach 2012 und 2014 fand 2016 zum 3. Mal der Workshop „MATHMET 2016 - International Workshop on Mathematics and Statistics for Metrology“ an der PTB Berlin statt. Die Veranstaltung wurde gemeinsam mit NIST, SIM und EURAMET organisiert. In mehr als 30 Vorträgen von Sprechern aus Europa und Übersee wurden an 3 Tagen aktuelle mathematische und statistische Fragestellungen in der Metrologie diskutiert. Der Workshop ist zugleich die erste Aktivität des in 2016 gegründeten Zentrums „MATHMET: The European Centre for Mathematics and Statistics in Metrology“. (M. Bär, FB 8.4, markus.baer@ptb.de; C. Elster, FB 8.4, clemens.elster@ptb.de)

#### Bayes'sche Datenanalyse auf der Statistischen Woche 2016

Auf der internationalen Konferenz „Statistical Week“, die im September 2016 in Augsburg stattfand, gab es erstmals eine eigene Sektion zum Thema „Bayes'sche Datenanalyse“. Die PTB war eingeladen worden, diese Sektion zu organisieren. Die Resonanz auf diese Sektion war erfreulich groß und es konnten drei einzelne „Sessions“ mit mehreren internationalen Beiträgen durchgeführt werden. Die PTB war dabei mit zwei Vorträgen vertreten. (O. Bodnar, FB 8.4, olha.bodnar@ptb.de; FB 8.4 clemens.elster@ptb.de)

#### Europäisches Projekt zur Risikoanalyse für Software im gesetzlichen Messwesen

Nach dem Inkrafttreten der neuen europäischen Messgeräte Richtlinie (Measuring Instruments Directive 2014/32/EU) gilt seit dem 20.4.2016 eine neue Anforderung an Messgeräte. Für diese muss vom Hersteller eine angemessene Risikoanalyse durchgeführt werden.

Der Fachbereich 8.5 hat eine Risikoanalysemethode für Software entwickelt, die von Messgeräteherstellern genutzt werden kann, um die entsprechend geforderte Risikobewertung anzufertigen. Dabei besteht der Vorteil in der Vergleichbarkeit von Risikoanalysen und der Gleichbehandlung aller Hersteller unabhängig von der Geräteart. Mit dem Ziel, dieses Vorgehen auch europaweit zu harmonisieren, hat eine Projektgruppe der WELMEC-Arbeitsgruppe 7 „Software“ im Januar 2016 damit begonnen, einheitliche Anforderungen an eine Risikoanalyse zu formulieren. Diese Tätigkeit wurde nun in einen Antrag für ein europäisch gefördertes EMPIR-Projekt überführt. Ein Konsortium aus Benannten Stellen, Universitäten, außeruniversitären Forschungsein-

richtungen und Herstellerverbänden widmet sich darin zunächst der Validierung des an der PTB entwickelten Verfahrens. Dazu werden Ringvergleiche anhand realer und abstrakter Messgeräte zwischen den Partnern durchgeführt, das existierende Verfahren ggf. angepasst und verbessert. Weiterhin soll das Verfahren einer Praxiserprobung unterzogen werden.

In einem zweiten Schritt wird ein Verfahren erarbeitet, das auch auf komplexe Systeme anwendbar sein soll, die ggf. mehrere Messgeräte umfassen. Dabei soll auch die menschliche Einflussnahme durch Bediener und andere Betroffene berücksichtigt werden. Im Anschluss daran wird das Konsortium akzeptable technische Lösungen identifizieren und sammeln, die ein adäquates Schutzniveau für unterschiedliche Messgeräteklassen im Sinne der Messgeräte Richtlinie darstellen. Damit soll unter anderem der Einsatz neuer Technologien im gesetzlichen Messwesen, wie er von Herstellern vielfach gefordert wird, erleichtert werden. Neben der Weiterentwicklung und Erprobung der Risikoanalyseverfahren stellt die Standardisierung der Methoden ein zentrales Standbein des Projektes dar. Dazu sollen die Verfahren in die einschlägigen Normungs- und Harmonisierungsgremien (CEN/CENELEC, WELMEC, OIML) eingebracht werden. (M. Esche, FB 8.5, marko.esche@ptb.de)

---

# Kuratorium

Präsident des Kuratoriums

**MinDirig Stefan Schnorr**

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Berlin

Stellvertretender Präsident des Kuratoriums

**Prof. Dr. Wolfgang Ertmer**

Institut für Quantenoptik,  
Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover

**Prof. Dr. Gisela Anton**

Physikalisches Institut IV der Universität Erlangen

**Dr. Norbert Burger**

Köln

**Prof. Dr. Dr. med. Jürgen Debus**

Radioonkologie und Strahlentherapie  
Universitätsklinikum Heidelberg

**Prof. Dr. Cornelia Denz**

Institut für Angewandte Physik der Westfälischen  
Wilhelms-Universität Münster

**Prof. Dr. Olaf Dössel**

Institut für Biomedizinische Technik,  
Karlsruher Institut für Technologie

**Prof. Dr. Claudia Eckert**

Fakultät für Informatik der Technischen Universität  
München und Fraunhofer-Institut für Angewandte und  
Integrierte Sicherheit (AISEC)

**Dr. Matthias Fankhänel**

BASF SE, Ludwigshafen

**Dr. Hermann Gerlinger**

Aalen

**Dr. Petra Gowik**

Bundesamt für Verbraucherschutz und  
Lebensmittelsicherheit, Berlin

**Prof. Dr. Axel Haase**

Zentralinstitut für Medizintechnik,  
Technische Universität München, Garching

Ehrenkurator

**Prof. Dr. Dr. h. c. mult. Theodor W. Hänsch**

Ludwig-Maximilians-Universität, München

**Klaus Helmrich**

Siemens AG, Nürnberg

**Prof. Dr.-Ing. Anke Kaysser-Pyzalla**

Helmholtz-Zentrum Berlin

**Dr. Anja Kessler**

Referenzinstitut für Bioanalytik, Bonn

**Prof. Dr. Wolfgang Ketterle**

Massachusetts Institute of Technology, USA

**Prof. Dr.-Ing. habil. Wolfgang Kowalsky**

Institut für Hochfrequenztechnik  
Technische Universität Braunschweig

**Prof. Dr. Gerald Linke**

Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V., Bonn

**Veronika Martens**

Bovenden

**Dr. Monika Mattern-Klosson**

Leybold GmbH, Köln

**Prof. Dr. Jürgen Mlynek**

Fachbereich Physik, Humboldt-Universität zu Berlin

**Dr.-Ing. Eberhard Petit**

Landesbetrieb Mess- und Eichwesen Nordrhein-Westfa-  
len, Köln

**Prof. Dr. Dr. h. c. Roland Sauerbrey**

Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf

**Dr. Thomas Sesselmann**

Dr. Johannes Heidenhain GmbH, Traunreut

**Dr. Nathalie von Siemens**

Siemens Stiftung, München

Ehrenkurator

**Prof. Dr. Dr. h. c. mult. Klaus von Klitzing**

Max-Planck-Institut für Festkörperforschung, Stuttgart

Ehrenkurator

**Prof. Dr. Dr. h. c. mult. Heinz-Georg Wagner**

Institut für Physikalische Chemie, Universität Göttingen

**Prof. Dr. Martin Winterkorn**

Volkswagen AG, Wolfsburg

**Prof. Dr. Ulrike Woggon**

Institut für Optik und Atomare Physik der Technischen  
Universität Berlin

**Präsidium**

Präsident	Vizepräsident	Mitglied des Präsidiums
Prof. Dr. J. Ullrich ☎ 1000	Dr. R. Schwartz ☎ 2000	Dr. J. Stenger ☎ 3000

Präsidialer Stab

\*Dr. H. Rabus  
☎ 1009

Presse- und Öffentlichkeitsarbeit

Dr. Dr. J. Simon  
☎ 3005

**Abteilung 1  
Mechanik und Akustik**

Prof. Dr. F. Härtig  
☎ 1010

**Abteilung 2  
Elektrizität**

Dr. U. Siegner  
☎ 2010

**Abteilung 3  
Chemische Physik und  
Explosionsschutz**

Dr. B. Güttler  
☎ 3010

**Abteilung 4  
Optik**

Prof. Dr. S. Kück  
☎ 4010

**Abteilung 5  
Fertigungsmesstechnik**

Dr. H. Bosse  
☎ 5010

Fachbereich 1.1  
Masse - Weitergabe der  
Einheit

Dr. D. Knopf  
☎ 1100

Fachbereich 2.1  
Gleichstrom und  
Niederfrequenz

Dr. J. Melcher  
☎ 2100

Fachbereich 3.1  
Metrologie in der  
Chemie

Dr. R. Stosch  
☎ 3100

Fachbereich 4.1  
Photometrie und  
angewandte Radiometrie

\*Prof. Dr. S. Kück  
☎ 4100

Fachbereich 5.1  
Oberflächenmesstechnik

Dr. L. Koenders  
☎ 5100

Fachbereich 1.2  
Festkörpermechanik

Dr. R. Kumme  
☎ 1200

Fachbereich 2.2  
Hochfrequenz und  
Felder

Dr. T. Schrader  
☎ 2200

Fachbereich 3.2  
Gasanalytik und  
Zustandsverhalten

Prof. Dr. V. Ebert  
☎ 3200

Fachbereich 4.2  
Bild- und Wellenoptik

Dr. E. Buhr  
☎ 4200

Fachbereich 5.2  
Dimensionelle  
Nanometrologie

Dr. J. Flügge  
☎ 5200

Fachbereich 1.3  
Geschwindigkeit

Dr. R. Wynands  
☎ 1300

Fachbereich 2.3  
Elektrische  
Energietechnik

Dr. M. Kahmann  
☎ 2300

Fachbereich 3.3  
Thermophysikalische  
Größen

Prof. Dr. R. Fernandes  
☎ 3300

Fachbereich 4.3  
Quantenoptik und  
Längeneinheit

Dr. H. Schnatz  
☎ 4300

Fachbereich 5.3  
Koordinatenmesstechnik

Dr. K. Kniel  
☎ 5300

Fachbereich 1.4  
Gase

Dr. H. Többen  
☎ 1400

Fachbereich 2.4  
Quantenelektronik

Dr. A. Zorin  
☎ 2400

Fachbereich 3.4  
Physikalische Chemie

\*Dr. B. Güttler  
☎ 3010

Fachbereich 4.4  
Zeit und Frequenz

Dr. E. Peik  
☎ 4400

Fachbereich 5.4  
Interferometrie an  
Maßverkörperungen

Dr. R. Schödel  
☎ 5400

Fachbereich 1.5  
Flüssigkeiten

Dr. G. Wendt  
☎ 1500

Fachbereich 2.5  
Halbleiterphysik und  
Magnetismus

Dr. H. W. Schumacher  
☎ 2500

Fachbereich 3.5  
Explosionsschutz in der  
Energietechnik

Dr. D. Markus  
☎ 3500

Fachbereich 4.3  
Quantenoptik und  
Längeneinheit

Dr. H. Schnatz  
☎ 4300

Fachbereich 5.5  
Wissenschaftlicher  
Gerätebau

Dr. F. Löffler  
☎ 5500

Fachbereich 1.6  
Schall

Dr. C. Koch  
☎ 1600

Fachbereich 2.6  
Elektrische  
Quantenmetrologie

Dr. F. J. Ahlers  
☎ 2600

Fachbereich 3.6  
Explosionsschutz  
Sensorik und  
Messtechnik

Dr. F. Lienesch  
☎ 3600

Fachbereich 4.4  
Zeit und Frequenz

Dr. E. Peik  
☎ 4400

Fachbereich 5.4  
Interferometrie an  
Maßverkörperungen

Dr. R. Schödel  
☎ 5400

Fachbereich 1.7  
Akustik und Dynamik

Dr. T. Bruns  
☎ 1700

Fachbereich 2.6  
Elektrische  
Quantenmetrologie

Dr. F. J. Ahlers  
☎ 2600

Fachbereich 3.7  
Grundlagen des  
Explosionsschutzes

Dr. M. Beyer  
☎ 3700

Fachbereich 1.8  
Masse - Darstellung der  
Einheit

Dr. H. Bettin  
☎ 1800

QUEST  
Institut an der PTB

Prof. Dr. P. O. Schmidt  
☎ 4700

FPM  
Fundamentale Physik für  
Metrologie

Prof. Dr. A. Surzhykov  
☎ 8100

Nachwuchsgruppe  
4.01 Metrologie für  
funktionale Nanosysteme

Dr. S. Kroker  
☎ Tel.: 4530



# Organigramm

Stand: 1. Dezember 2016

Konformitäts-  
bewertungsstelle

Dr. R. Schwartz  
☎ 2000

Leiter des Instituts  
Berlin und Vertreter des  
Präsidenten in Berlin

Dr. G. Ulm  
☎ (Ch) 7312

Qualitätsmanager

Dr. K. Stoll-Malke  
☎ 8330

Interne Revision

T. Hohlweg  
☎ 9012

Abteilung 6  
**Ionisierende Strahlung**

\*Dr. J. Stenger  
☎ 6010

Abteilung 7  
**Temperatur und  
Synchrotronstrahlung**

Dr. G. Ulm  
☎ (Ch) 7312

Abteilung 8  
**Medizinphysik und  
metrologische  
Informationstechnik**

Prof. Dr. T. Schäffer  
☎ (Ch) 7343

Abteilung Q  
**Wissenschaftlich-  
technische  
Querschnittsaufgaben**

Dr. P. Ulbig  
☎ 8010

Abteilung Z  
**Verwaltungsdienste**

C. Tampier  
☎ 9010

Fachbereich 6.1  
Radioaktivität

Dr. D. Arnold  
☎ 6100

Fachbereich 7.1  
Radiometrie mit  
Synchrotronstrahlung

Prof. Dr. M. Richter  
☎ (Ad) 7100

Fachbereich 8.1  
Medizinische  
Messtechnik

Dr. B. Ittermann  
☎ (Ch) 7318

Referat Q.11  
Wissenschaftliche  
Bibliotheken

Dr. J. Meier  
☎ 8131

Referat Z.11  
Haushalt und  
Beschaffung

M. Wasmuß  
☎ 9110

Fachbereich 6.2  
Dosimetrie für  
Strahlentherapie und  
Röntgendiagnostik

Dr. U. Ankerhold  
☎ 6200

Fachbereich 7.2  
Kryophysik und  
Spektrometrie

Dr. T. Schurig  
☎ (Ch) 7290

Fachbereich 8.2  
Biosignale

Dr. L. Trahms  
☎ (Ch) 7213

Referat Q.12  
Sprachendienst

U. Baier-Blott  
☎ 9332

Referat Z.12  
Personal

S. Wiemann  
☎ 9120

Fachbereich 6.3  
Strahlenschutzdosimetrie

Dr. A. Röttger  
☎ 6300

Fachbereich 7.3  
Detektorradiometrie und  
Strahlungsthermometrie

Dr. J. Hollandt  
☎ (Ch) 7369

Fachbereich 8.3  
Biomedizinische Optik

Prof. Dr. R. Macdonald  
☎ (Ch) 7542

Fachbereich Q.3  
Gesetzliches Messwesen  
und Technologietransfer

Dr. D. Ratschko  
☎ 8300

Referat Z.13  
Justizariat

M. Gahrens  
☎ 9130

Fachbereich 6.4  
Neutronenstrahlung

Dr. A. Zimbal  
☎ 6400

Fachbereich 7.4  
Temperatur

Dr. J. Fischer  
☎ (Ch) 7473

Fachbereich 8.4  
Mathematische  
Modellierung und  
Datenanalyse

Prof. Dr. M. Bär  
☎ (Ch) 7687

Fachbereich Q.4  
Informationstechnologie

Dr. S. Hackel  
☎ 8400

Referat Z.14  
Organisation und  
Controlling

Dr. J. Jaspers  
☎ 9140

Fachbereich 6.5  
Strahlenwirkung

Dr. H. Rabus  
☎ 6600

Fachbereich 7.5  
Wärme und Vakuum

Dr. T. Lederer  
☎ (Ch) 7230

Fachbereich 8.5  
Metrologische  
Informationstechnik

Dr. F. Thiel  
☎ (Ch) 7529

Fachbereich Q.5  
Technische  
Zusammenarbeit

Dr. M. Stoldt  
☎ 8200

Referat Z.15  
Verwaltung Berlin

A. Lubinus  
☎ (Ch) 7449

Referat 6.71  
Betrieblicher  
Strahlenschutz

Dr. R. Simmer  
☎ 6710

Fachbereich IB.T  
Technisch-wissensch.  
Infrastruktur Berlin

Dr. F. Melchert  
☎ (Ch) 7446

Gruppe Q.6  
Technische Infrastruktur

G. Grüneberg-Damm  
☎ 8600

Referat Z.16  
Innerer Dienst

A. Grote  
☎ 9160

Referat Q.61  
Arbeitsschutz- und  
Sicherheitsmanagement

M. Frühauf  
☎ 9170

Referat Z.17  
Ausbildung

B. Weihe  
☎ 9240

Referat Q.62  
Technischer Dienst  
Braunschweig

B. Staab  
☎ 8620

Referat Z.18  
Betriebliche  
Fachanwendungen

M. Battikh  
R. Ohl  
☎ 3597 / 8430

Referat Q.63  
Werkfeuerwehr

B. W. Klöse  
☎ 9998

## Ausschüsse

Personal	A-PE	Dr. Löffler	☎ 5500
Investitionen	A-IV	Dr. Schwartz	☎ 2000
IT-Infrastruktur	A-IT	Dr. Hackel	☎ 8400
Metrologische Dienstleistungen	A-MD	Dr. Schwartz	☎ 2000
Internationale Zusammenarbeit	A-IZ	Dr. Stenger	☎ 3000
Qualitätsmanagement	A-QM	Dr. Stoll-Malke	☎ 8330
Forschungsprogramme	A-FP	Dr. Stenger	☎ 3000

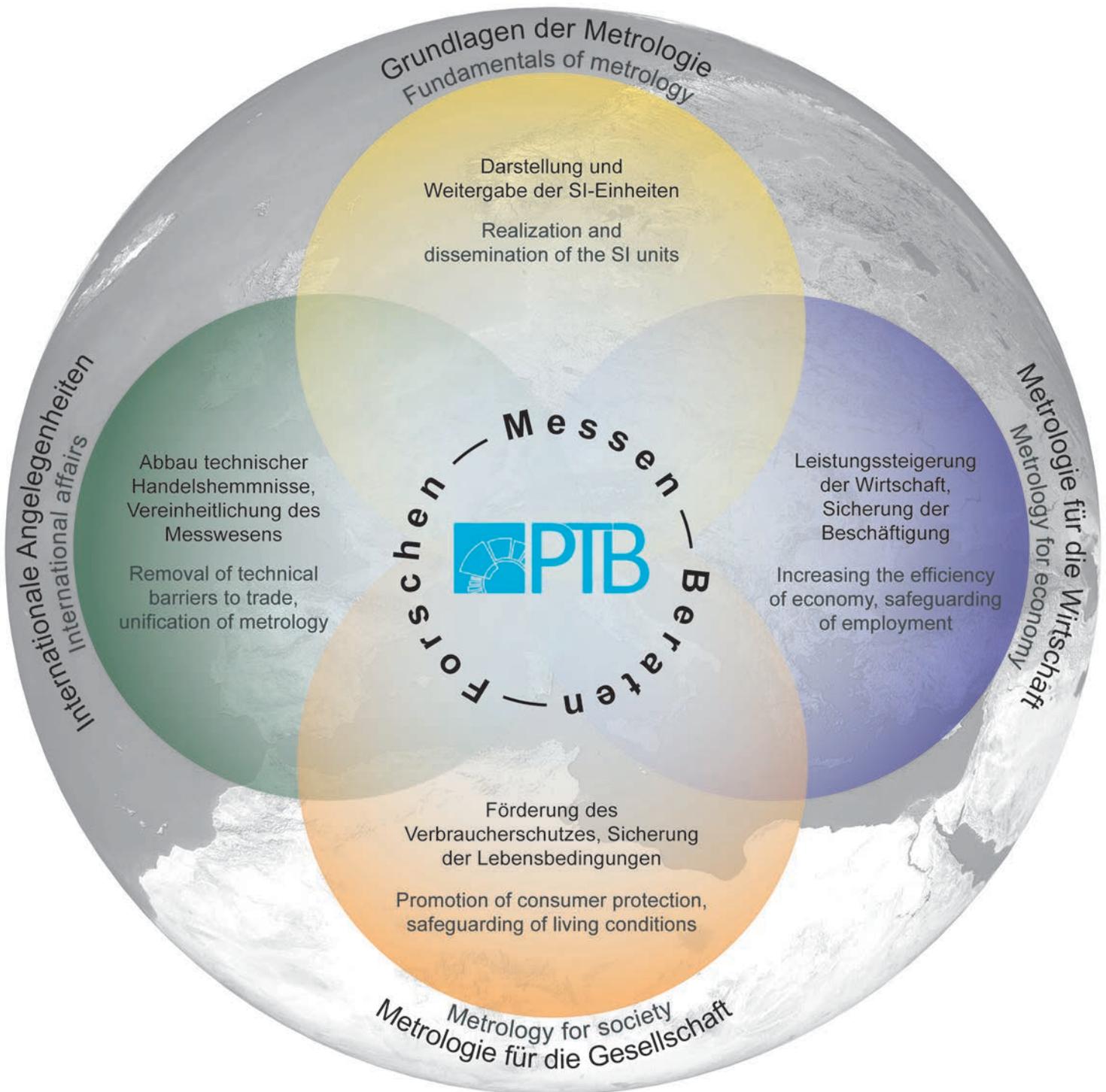
**Gesamtpersonalrat**  
**Örtlicher Personalrat Braunschweig**  
**Örtlicher Personalrat Berlin**  
**Gleichstellungsbeauftragte**  
**Gesamtvertretung der Schwerbehinderten**  
**Vertretung der Schwerbehinderten Braunschweig**  
**Vertretung der Schwerbehinderten Berlin**

S. Brandes ☎ 1098  
 W. Krien ☎ 1092  
 R. Thomas ☎ (Ch) 7337  
 B. Behrens ☎ 9133  
 R. Lütge ☎ 1097  
 R. Lütge ☎ 1097  
 C. Aßmann ☎ (Ch) 7964

## Zeichenerklärung

☎(0531) 592-0 Braunschweig/Durchwahl 592 ...  
 ☎(030) 3481-0 Berlin Charlottenburg (Ch)/Durchwahl 3481 ...  
 ☎(030) 3481-0 Berlin Adlershof (Ad)/Durchwahl 3481 ...  
 \*wahrgenommen durch

# Arbeitsgebiete und Ziele



### Die PTB – das nationale Metrologieinstitut Deutschlands

Die Physikalisch-Technische Bundesanstalt ist die „nationale Größe“ für richtiges und präzises Messen: Sie ist verantwortlich für die Darstellung und die Weitergabe der physikalischen Einheiten, sie ist metrologisches Forschungsinstitut und Dienstleister für Wissenschaft, Wirtschaft und Gesellschaft, und sie ist – weit über die nationalen Grenzen hinaus – eine der ersten Adressen der Metrologie überhaupt. Die Metrologie, die wissenschaftliche Basis des Messens und aller daraus folgenden Anwendungen, ist essenziell für unsere moderne Welt. Kein wissenschaftliches Experiment, kein industrieller Prozess und kein Waren- und Güterverkehr kommt ohne Quantifizierung aus. Messtechnik und ihr wissenschaftliches Rückgrat, die Metrologie, sind heute nahezu zu einer Selbstverständlichkeit geworden. Doch diese Selbstverständlichkeit präziser und vertrauenswürdiger Messungen muss erarbeitet werden; und dies nicht nur einmal, sondern fortwährend – synchron zu ständig steigenden Genauigkeitsforderungen der „metrologischen Kunden“. Der Auftrag an ein nationales Metrologieinstitut (NMI) wie die PTB lautet daher, für ein ständiges Funktionieren zu sorgen, mithin für eine zuverlässige und fortschrittliche messtechnische Infrastruktur, die sowohl den Ansprüchen der Wissenschaft und der Hightech-Industrie auf der einen Seite als auch den alltagsnahen Randbedingungen des gesetzlichen Messwesens auf der anderen Seite genügt. Unter dem Dach PTB sind alle diese Facetten vereint.

### Grundlagen der Metrologie

Der Bereich „Grundlagen der Metrologie“ umfasst die in der Satzung verankerten Arbeiten zur Darstellung und Weitergabe der SI-Einheiten und der gesetzlichen Zeit. Hierzu gehören insbesondere die Entwicklung und Bereitstellung von Primärnormalen und Normalmesseinrichtungen und der gegebenenfalls für die Weitergabe der Einheiten benötigten Sekundär- und Transfernormale. Mission ist „die Schaffung des Fundaments für das nationale Messwesen, das den heutigen und für die Zukunft absehbaren Anforderungen genügt“.

### Metrologie für die Wirtschaft

Für eine exportorientierte Volkswirtschaft wie die der Bundesrepublik Deutschland ist eine hochentwickelte metrologische Infrastruktur sowie die Verfügbarkeit metrologischen Know-hows auf höchstem Niveau zur Unterstützung der Entwicklung neuer Technologien eine unabdingbare Voraussetzung. Die PTB hat seit ihrer Gründung im Jahre 1887 zum Nutzen der deutschen Wirtschaft nicht nur die Basiseinheiten durch metrolo-

gische Grundlagenforschung dargestellt, sondern durch technische Entwicklungen von Normalen, Normalmessgeräten und erprobten Messverfahren Grundlagen für genaue und zuverlässige Messungen und Prüfungen in Industrie und Handel geschaffen. Die Durchdringung der Produktionsprozesse mit einer Messtechnik, die allen internationalen Ansprüchen gerecht wird, ist eine entscheidende Voraussetzung für zuverlässig funktionierende Qualitätsmanagement-Systeme in der Wirtschaft. Dabei ist es unverzichtbar, alle Messergebnisse auf das SI zurückzuführen.

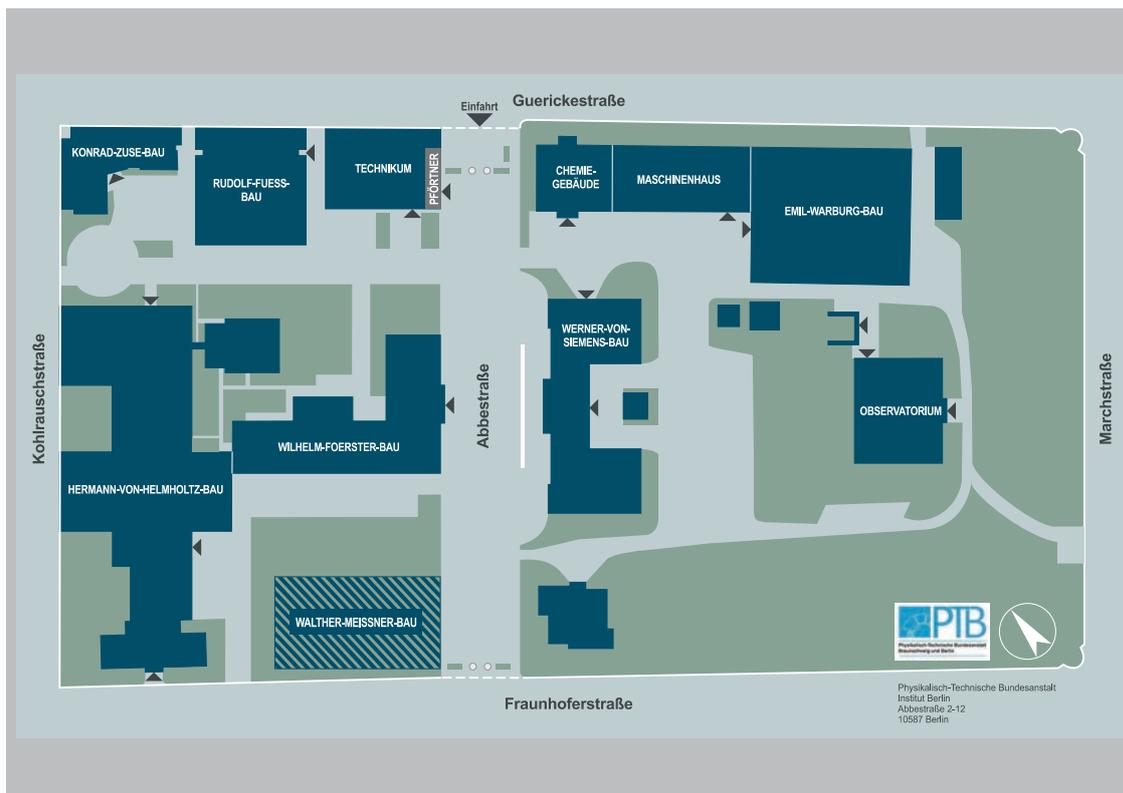
### Metrologie für die Gesellschaft

In weiten Bereichen des täglichen Lebens besteht ein besonderes öffentliches Interesse an richtigen Messergebnissen und zuverlässigen Messeinrichtungen. Die Metrologie für die Gesellschaft umfasst daher überwiegend Aufgaben, die gesetzlich geregelt sind. In einer Vielzahl von Gesetzen und Verordnungen sind der PTB verschiedene Tätigkeiten zugewiesen; in vielen dieser Rechtsvorschriften wird sie als einzige Stelle genannt. Hierin liegt eine besondere Verantwortung. Es ist Aufgabe der PTB, „Messtechnik und -verfahren zum angemessenen Schutz der Verbraucher im geschäftlichen und amtlichen Verkehr, der arbeitenden Bevölkerung im beruflichen Umfeld, zum Erhalt und der Wiederherstellung der Gesundheit, für die persönliche und industrielle Sicherheit sowie zum Schutz der Natur und Umwelt“ zur Verfügung zu stellen und einzusetzen.

### Internationale Angelegenheiten

Mit der Gründung der Meterkonvention im Jahre 1875 wurde auf höchster staatlicher Ebene manifestiert, dass Metrologie eine internationale Angelegenheit ist. Durch die zunehmende Globalisierung von Wirtschaft und Handel hat diese Aufgabe in den letzten Jahren erheblich an Bedeutung gewonnen. Im Geschäftsbereich „Internationale Angelegenheiten“ ist es Aufgabe der PTB, „zur internationalen Einheitlichkeit des Messwesens und damit zum Abbau nichttarifärer Handelshemmnisse beizutragen“. Hierzu dienen Kooperationen mit anderen nationalen Metrologieinstituten, maßgebliche Mitarbeit in den internationalen Gremien und technisch-ökonomische Zusammenarbeit mit Entwicklungs- und Schwellenländern. Wesentliches Element der Kooperation mit Partnerinstituten sind internationale „Key Comparisons“ von Normalen und Normalmesseinrichtungen und sich daraus ableitende F&E-Arbeiten. Im Rahmen der internationalen Abkommen zur gegenseitigen Anerkennung von Messergebnissen und Zertifikaten der nationalen Metrologieinstitute und der akkreditierten Prüf- und Kalibrierlaboratorien kommt diesen Vergleichen besondere Bedeutung zu.

# Geländeplan Berlin-Charlottenburg



## Gebäude in Braunschweig

### Gebäude (Building):

Abbe-Bau (V)  
 Annahme und Versand  
 (Delivery and Shipment) (A)  
 Bessel-Bau (M)  
 Bibliothek (Library) (K)  
 Bothe-Bau (S)  
 Bereitstellungslager (P)  
 Bunsen-Bau (Q)  
 Betriebswerkstätten  
 (Workshops) (T)  
 Chadwick-Bau (G)  
 Elster-Geitel-Bau (S)  
 Einstein-Bau (C)  
 Explosionsprüfstand  
 (Explosion test rig) (Q)  
 Fahrbereitschaft  
 (Driver pool) (R)  
 Gauss-Bau (V)  
 Gästehaus  
 (Guest House) (V)  
 Geiger-Bau (S)  
 Glocker-Bau (T)  
 Giebe-Bau (L)  
 Gumlich-Haus (P)  
 Hahn-Bau (L)  
 Heisenberg-Bau (C)  
 Helmholtz-Bau I (K)  
 Helmholtz-Bau II (K)

Hertz-Bau (K)  
 Hörsaal (Auditorium) (C)  
 Kasino (K)  
 Kids & Co-Bau  
 (Kita und Wissensforscher) (L)  
 Kohlrusch-Bau (C)  
 Kopfermann-Bau (U)  
 v.-Laue-Bau (V)  
 Leibniz-Bau (U)  
 Meissner-Bau (K)  
 Meitner-Bau Gerätebau (Q)  
 Meitner-Bau Laborgebäude (Q)  
 Meitner-Bau Galvanik (Q)  
 Meitner-Bau Materiallager (Q)  
 Schlichting-Bau (R)  
 Nernst-Bau (R)  
 Ohm-Bau (C)  
 Paschen-Bau (L)  
 Personalrat (Staff Council) (E)  
 Planck-Bau (H)  
 Prandtl-Bau (R)  
 Röntgen-Bau (S)  
 Reinraumzentrum  
 (Clean Room Centre) (C)  
 Raumzellen-Bau 4 (RZB 4) (Q)  
 Raumzellen-Bau 6 (RZB 6) (S)  
 Schering-Bau (R)  
 Seminarzentrum  
 (Conference Centre) (C)  
 Sicherheitstechnik  
 (Safety Technology) (F)

Vieweg-Bau (B)  
 Weber-Bau (R)  
 Werkfeuerwehr (Fire Brigade) (R)  
 Wohnhaus Ost  
 (Residential Building East) (E)  
 Wohnhaus West  
 (Residential Building West) (A)  
 Willy-Wien-Turm (R)  
 Zentralgebäude  
 (Central Building) (K)

### Einrichtungen / Institute auf dem Gelände (External Facilities and Institutions):

- Deutsche Akkreditierungsstelle (DAkS), Vieweg-Bau (B)
- EURAMET e.V., Zentralgebäude (Central Building) (K)
- QUEST@PTB, v.-Laue-Bau (V)
- Underwriters Laboratories (UL), Raumzellen-Bau 4 (Q)
- VDE Prüf- und Zertifizierungsinstitut GmbH, Weber-Bau (R)





Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

Die Physikalisch-Technische Bundesanstalt, das nationale Metrologieinstitut, ist eine wissenschaftlich-technische Bundesoberbehörde im Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie.

#### **Anschriften der PTB**

Standort Braunschweig:  
Physikalisch-Technische Bundesanstalt  
Bundesallee 100  
38116 Braunschweig

Standort Berlin-Charlottenburg:  
Physikalisch-Technische Bundesanstalt  
Abbestraße 2–12  
10587 Berlin

E-Mail: [info@ptb.de](mailto:info@ptb.de)  
[www.ptb.de](http://www.ptb.de)

#### **Impressum**

Herausgegeben von der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt  
ISNI: 0000 0001 2186 1887  
Braunschweig, März 2017  
Satz, Gestaltung: PTB, Presse- und Öffentlichkeitsarbeit  
Übersetzung: PTB-Sprachendienst  
Druck: Fischer Druck, Peine  
Nachdruck mit Quellenangabe gestattet

**ISSN 0340-4366**