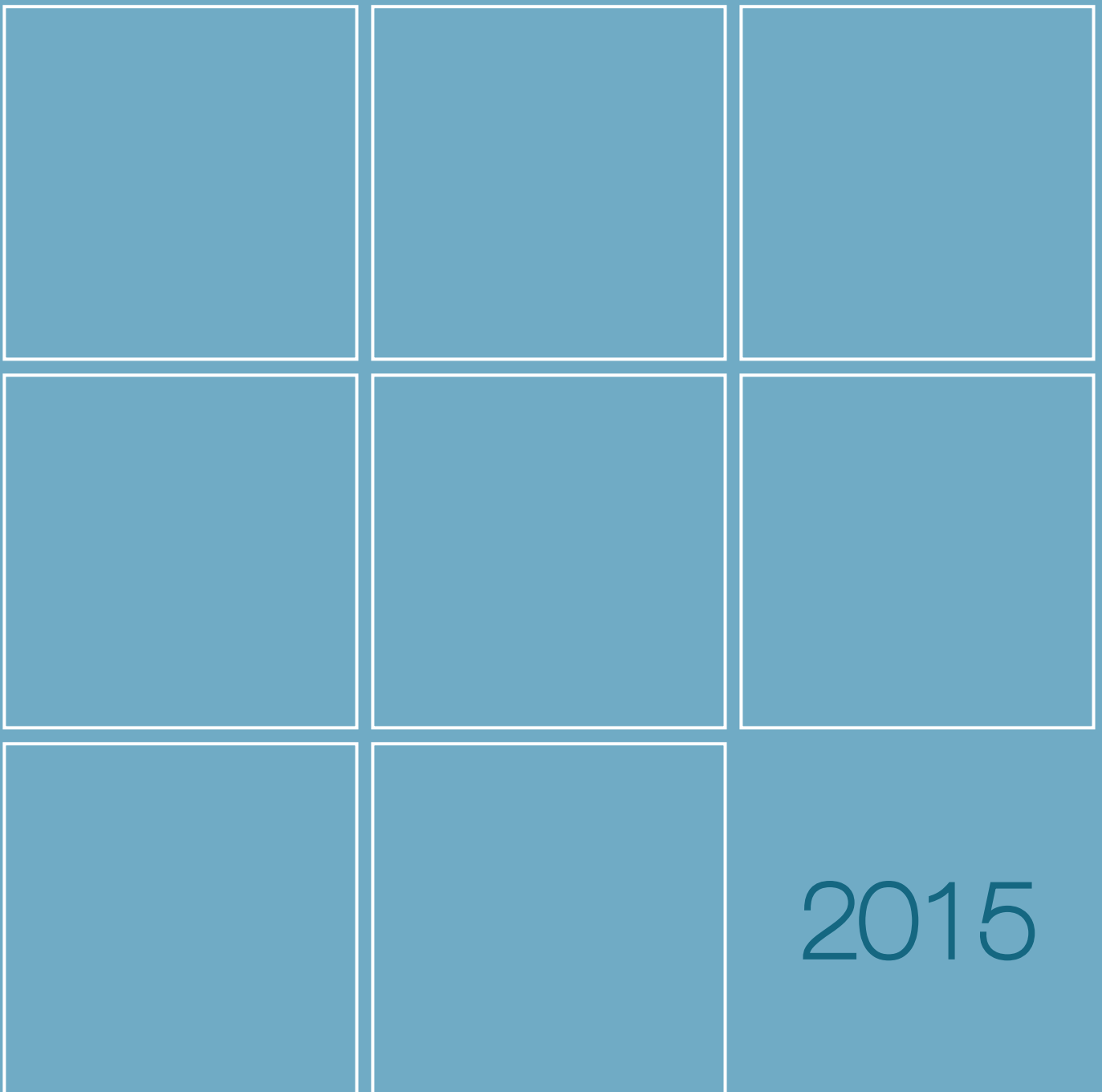




# PTB jahresbericht

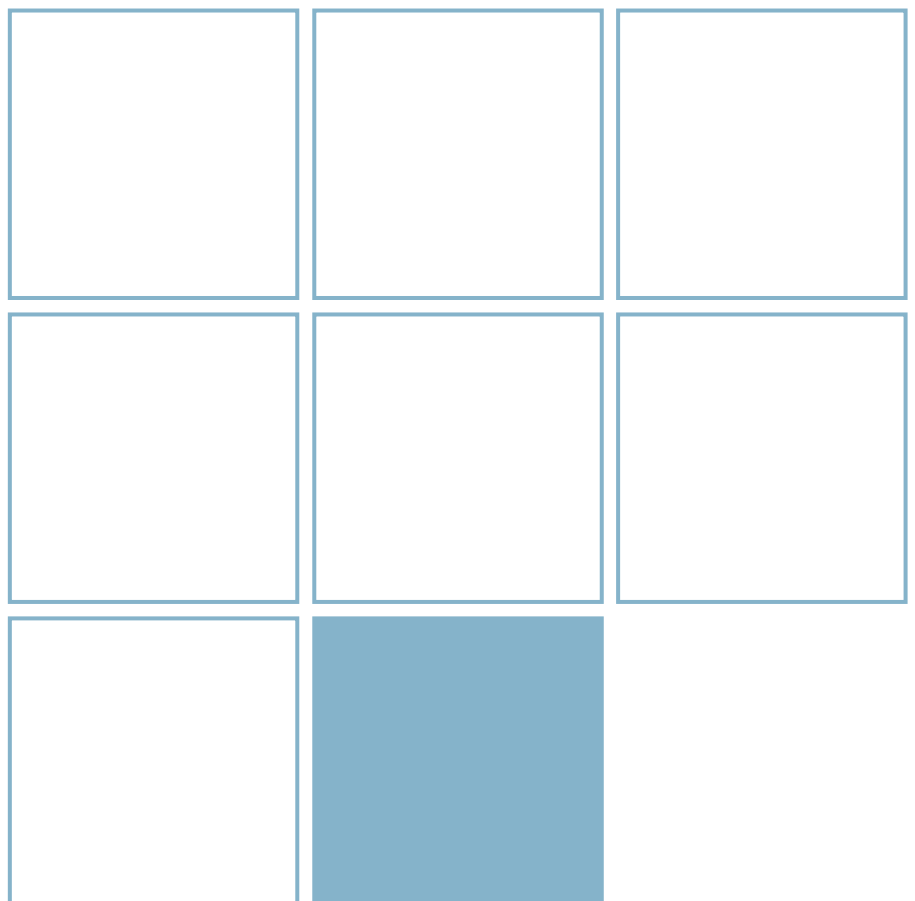
Annual Report

---



2015

Physikalisch-Technische  
Bundesanstalt  
Jahresbericht 2015



# Vorwort

„Die zentrale Mission und der Anspruch der PTB ist es, eine innovative messtechnische Infrastruktur auf höchstem internationalen Niveau in Deutschland zur Förderung der exportorientierten High-tech-Wirtschaft, zur Hinterlegung der Ansprüche einer komplexen Gesellschaft und zur Unterstützung einer weltweit an vorderster Front agierenden Wissenschaft zur Verfügung zu stellen.“ So steht es in der Zielvereinbarung zwischen dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie und der PTB für die Jahre 2015 bis 2019, die am 12. Januar 2016 von Staatssekretär Machnig und mir unterzeichnet wurde. Zusammen mit dem neu erarbeiteten „Arbeits- und Forschungsprogramm 2015 bis 2017“ sind somit die mittelfristigen Leitlinien mit den Schwerpunkten „Innovation und Industrie“, „Energie und Umwelt“, „Mensch und Gesundheit“, „Gesetzliches und internationales Messwesen“ sowie „Das neue System der Einheiten“ klar umrissen.

Das Jahr 2015 stand wesentlich unter dem Zeichen, die PTB nicht nur thematisch, sondern vor allem auch strukturell so aufzustellen, dass sie den zukünftigen Herausforderungen gewachsen ist. So wurde ein Liegenschaftskonzept für die ca. 80 Gebäude der PTB in Braunschweig und Berlin erarbeitet, welches zahlreiche Sanierungsmaßnahmen von Gebäuden, Netzen und Klimatisierungstechnik vorsieht. Darauf aufbauend wurde ein Masterplan für die bauliche Entwicklung von 2016 bis 2035 entwickelt, der die zeitliche Reihenfolge für den Bau von 19 benötigten neuen Gebäuden festlegt.

Weitere strukturelle Maßnahmen zielten auf die Bereiche Führungspersonal und Mitarbeiterzufriedenheit ab. Das erste „PTB-Forum“ zur Förderung der Kommunikation der Mitarbeiter/innen mit dem Präsidium am 17. September 2015 stand unter dem Motto „Befristetes Personal in der PTB: Perspektiven und Chancen“. Gemeinsam wurde diskutiert, dass es für die PTB von entscheidender Bedeutung ist, zeitlich befristete Spitzenforschung zu betreiben. Befristet beschäftigten Mitarbeiter/innen bietet sich eine Vielzahl von Möglichkeiten: Durch die Aussetzung des Stellenabbaus gibt es häufiger eine dauerhafte Perspektive an der PTB, durch ein breit angelegtes Trainee-Programm eröffnen sich den besten Nachwuchskräften neue Chancen, und durch Kollaborationen mit Hochschulen, Industrie und Forschungseinrichtungen ergeben sich neue Weiterbeschäftigungsmöglichkeiten.

Drei hervorragend besuchte „Führungskräfte“ zu aktuellen Themen sind ein neuer Bestandteil der Führungskräftefortbildung an der PTB. Zudem wurden spezifisch für die PTB ausgelegte Assessment-Centers eingeführt. Sie sollen helfen, Verbesserungspotenziale zu identifizieren und die Führungskräfte für den Alltag zu rüsten.

Nicht zuletzt wurde die Familienfreundlichkeit der PTB durch die Einrichtung eines Familienbüros weiter gestärkt. Nach einem umfassenden Audit durch „berufundfamilie“ ist die PTB nun im Mai 2015 auch offiziell als familienbewusste Arbeitgeberin zertifiziert.

Die durch das neue Mess- und Eichgesetz deutlich veränderten Rahmenbedingungen führten unter anderem zu der Gründung der Konformitätsbewertungsstelle (KBS) an der PTB. Die PTB leitet den Regelermittlungsausschuss und den Ausschuss der KBS (AdKBS) und nimmt damit weiterhin eine prominente Position im gesetzlichen Messwesen in Deutschland ein. Die neue Struktur schlägt sich in der neu formulierten Satzung der PTB und in der neu definierten Rolle der Vollversammlung für das Mess- und Eichwesen nieder.

Dienstleistungen auf höchstem Niveau bietet die PTB z. B. im Bereich größter Drehmomente. Durch das vom BMWi mit nahezu 10 Mio. € geförderte Kompetenzzentrum Windenergie wird die weltweite Spitzenstellung der PTB in diesem Bereich ausgebaut. Andere Beispiele von hochspezialisierten Dienstleistungen umfassen die Koordinatenmesstechnik, die Konformitätsbewertung und Zertifizierung von Geschwindigkeitsmessgeräten, die Charakterisierung von Radarsignalen in der Flugsicherung, die Eigensicherheit von Netzverbindungen in explosionsgefährdeten Bereichen der Prozessindustrie, die Sicherstellung der Patientensicherheit bei bildgebenden Verfahren und die rückführbare Messung kleinster Verunreinigungen im Wasser oder von Umweltbelastungen durch Radioaktivität. Diese Dienstleistungen können nur dann zuverlässig und zeitnah erbracht werden, wenn die PTB in all diesen Bereichen intensive eigene Forschung betreibt.

Somit ist Forschung ein entscheidendes Element des „Innovationszyklus“ der PTB. Sie ist die eigentliche „Quelle“ zukünftiger Entwicklungen und macht uns zum attraktiven Partner für Technologietransfer. Das unter PTB-Führung neu aufgesetzte „TransMeT“-

Programm verfolgt genau den letztgenannten Zweck und ist mit acht geförderten Projekten sehr erfolgreich angelaufen. Prüflastnormale für die rückgeführte Charakterisierung von elektrischen Stromnetzen, Referenzmaterialien für die Charakterisierung von Terahertz-Signalen sowie Softwarearchitekturen für eine stabile und sichere Netzanbindung von Medizingeräten sind hier einige Beispiele.

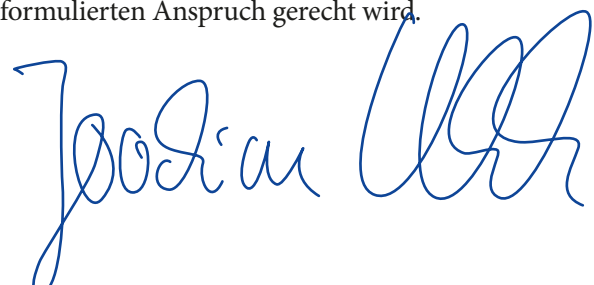
Die PTB-Forschungskompetenz wird durch den konsequenten Ausbau der Kollaboration mit Universitäten weiter gestärkt. Gemeinsam mit der TU Braunschweig wurden eine Professur für „Fundamentale Theorie für die Metrologie“ und eine Juniorprofessur für „Metrologie funktionaler Nanosysteme“ eingerichtet. Der Bau des gemeinsamen Gebäudes für das „Laboratory for Emerging Nanosystems“ (LENA) konnte 2015 beginnen. Initiiert von der PTB gelang es, die QUANOMET-Kooperation zwischen der TU Braunschweig und der Leibniz Universität Hannover ins Leben zu rufen, die vom Land Niedersachsen mit jährlich 1,5 Mio. € für zunächst fünf Jahre gefördert wird. QUANOMET soll die Verbindung von Quanten- und Nanometrologie vorantreiben. In Berlin steht ein Rahmenvertrag mit der Technischen Universität kurz vor dem Abschluss. Er soll die Grundlage erster gemeinsamer Berufungen in den Bereichen bildgebende Medizin, sichere Netzanbindung von Messgeräten und Wärmestrommessung bilden. Unter dem Motto „MetroSommer 2016 – Dein genauester Sommer“ wird die PTB 2016 erstmals ein Sommerstudentenprogramm anbieten, um exzellenten Nachwuchs für die Metrologie zu begeistern.

Das „European Metrology Programme for Innovation and Research“ (EMPIR) ist 2015 erfolgreich angelaufen. In den ersten Ausschreibungen gelang es der PTB, ca. 30 % der den 28 Mitgliedsländern zur Verfügung stehenden Mittel einzuwerben. Insgesamt stehen in den Jahren 2014 bis 2020 ca. 600 Mio. € zur Verfügung, um der europäischen Metrologie die weltweite Spitzenstellung zu sichern. In Zukunft wird es wesentlich darauf ankommen, die Metrologie und insbesondere die metrologischen Dienstleistungen in Europa zu vernetzen. Hier sind nicht zuletzt von der PTB initiierte und geführte Netzwerke wegweisend, wie MATHMET zur Koordinierung von Mathematik und Statistik in der Metrologie oder TraCIM, eine Plattform zur internetbasierten Softwarevalidierung für metrologische Auswertalgorithmen.

Auch dieses Jahr haben PTB-Forscher eine Vielzahl herausragender Ergebnisse erzielt: Erstmals gelang es, zwei optische Uhren über weite Entfernungen, nämlich zwischen Braunschweig und Paris, mit weltweit höchster Genauigkeit zu vergleichen. Zudem tickt die PTB-Ytterbium-Ionenuhr nun mit einer international bisher nicht erreichten relativen Messunsicherheit von nur  $3 \cdot 10^{-18}$  – beides wichtige Schritte, um in Zukunft die Sekunde bis zu hundertmal genauer zu realisieren. Kleinste Ströme wurden durch Zählen einzelner Elektronen in Einzelelektronenpumpen und mittels ausgeklügelter Fehlerkorrektur mit bisher unerreichbarer Genauigkeit gemessen. Die Planck-Konstante wurde im Avogadro-Projekt mit der weltweit zweitgeringsten Unsicherheit gemessen und die Arbeiten zur Bestimmung der Boltzmann-Konstanten wurden vielversprechend vorangetrieben. So konnte die PTB ihre Schlüsselrolle bei der anstehenden Revision des internationalen Einheitensystems behaupten. Hochpräzise Messreihen an der „Metrology Light Source“ (MLS) machten Molekülorbitale sichtbar, Magnetresonanztomografie (MRT) und Messungen magnetischer Signale visualisierten Reaktionen an den Gehörzentren des Gehirns, die von eigentlich „unhörbarem“ Infraschall hervorgerufen wurden.

Bei verschiedenen Auslandsreisen konnte ich mich ein weiteres Mal der höchsten Anerkennung vergewissern, welche die PTB weltweit genießt. Anlässlich meines Besuches am nationalen Metrologieinstitut in Thailand waren mehr als hundert Gäste aus Industrie, Forschung und Messtechnik unter Anwesenheit des Forschungsministers, des deutschen Konsuls und Wirtschaftsattachés geladen.

Ich bedanke mich herzlich bei allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern für ihr großes Engagement und ihren Einsatz, nicht zuletzt auch bei der öffentlichen Darstellung der PTB auf den neuen Internet-Seiten oder auf der „IdeenExpo“. Sie alle tragen dazu bei, dass die PTB in metrologischer Dienstleistung und Forschung national und international an vorderster Front agiert und so ihrem in der Zielvereinbarung formulierten Anspruch gerecht wird.





# Foreword

“PTB’s central mission and the demands it places on itself are to make available an innovative metrological infrastructure at the highest international level in Germany to promote Germany’s export-oriented high-tech economy, to meet the demands of a complex society and to support science that is operating at the cutting edge worldwide.” This is what is stated in the “Agreement on Objectives” for the years from 2015 to 2019 between the Federal Ministry for Economic Affairs and Energy (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie – BMWi) and PTB, which was signed on 12 January 2016 by State Secretary Machnig and me. Both this agreement and the newly developed “Work and research program 2015 to 2017” thus clearly define PTB’s medium-term guidelines focusing on “Innovation and industry”, “Energy and the environment”, “Humans and health”, “Legal and international metrology” as well as “The new System of Units”.

The main focus in 2015 was to set up PTB not only thematically but – above all – structurally in such a way that it can meet its future challenges. A real estate concept was thus developed for PTB’s approx. 80 buildings in Braunschweig and Berlin. This concept envisages numerous refurbishment measures for buildings, power and water networks, and for air-conditioning systems. Based on this, a master plan for PTB’s construction and refurbishment work from 2016 to 2035 was developed, which sets out the order in which 19 new buildings that are needed will be constructed.

Additional structural measures were directed at the areas covering managerial staff and the job satisfaction of PTB employees. The first “PTB Forum” supporting communication between staff and PTB’s Presidential Board took place on 17 September 2015 with its theme being “Fixed-term employees at PTB: Perspectives and opportunities”. During the forum, joint discussions were held on the critical importance for PTB of undertaking fixed-term research of the highest level. Employees on fixed-term contracts are offered a variety of prospects: The suspension of job cuts means long-term perspectives at PTB occur more frequently; a broad-based trainee program means the opening up of new chances for the best young members of staff; and collaborating with universities, industry and research institutes means that new possibilities for further employment result.

Three excellently attended “*Führungskräfte*tage” (one-day management meetings) on topical issues are

a new element of management training at PTB. In addition, “Assessment Center” evaluations, specially designed for PTB, were introduced. They are supposed to help identify potential areas for improvement and to equip managerial staff for everyday working life.

Not least, PTB’s family-friendliness has been further strengthened by setting up a Family Office. After an extensive audit by “*berufundfamilie*”, PTB was officially certified as a family-friendly employer in May 2015.

The legal framework conditions, which have been markedly altered by the new *Mess- und Eichgesetz* (Measures and Verification Act), have led, among other things, to the foundation of the *Konformitätsbewertungsstelle* (KBS) (the Conformity Assessment Body) at PTB. PTB heads the *Regelermittlungsausschuss* (the Rule Determination Committee) and the *Ausschuss der KBS* (AdKBS) (the Committee of the Conformity Assessment Bodies) and as such continues to hold a prominent position in legal metrology in Germany. This new structure is expressed in the newly formulated Charter of PTB and in the newly defined role of the *Vollversammlung für das Mess- und Eichwesen* (General Assembly on Metrology and Verification).

PTB provides services at the highest level, e.g. in the sector covering the largest torques. The “*Zentrum für Windenergie*” (Center for Wind Energy), which is being supported by the BMWi with almost €10 million, will further consolidate PTB’s top worldwide position in this sector. Other examples of highly specialized services include coordinate metrology, conformity assessment and the certification of speed measuring instruments, the characterization of radar signals in air-traffic control, the intrinsic safety of grid connections in potentially explosive atmospheres of the processing industry, the ensuring of patient safety in clinical imaging procedures, and the traceable measurement of the smallest impurities in water or from environmental pollution through radioactivity. These services can only then be performed reliably and promptly if PTB undertakes its own intensive research in all these fields.

Research is thus a crucial element of PTB’s “innovation cycle”. It is the actual “source” of future developments and makes us an attractive partner for technology transfers. The newly established “TransMeT” Program which was launched under the leadership of

PTB, is following exactly that last-mentioned purpose and has begun very successfully with eight projects being supported. Test load standards for the traceable characterization of electric power grids, reference materials for characterizing terahertz signals, as well as software architecture for the stable and secure grid connection of medical devices are some examples of such projects.

PTB's competence in research is being further strengthened by consistently expanding our collaboration with universities. A professorship in "Fundamental Theory for Metrology" and a junior professorship in "Metrology of Functional Nanosystems" were jointly set up with the *Technische Universität Braunschweig (TU Braunschweig)*. Constructing the shared building for the Laboratory for Emerging Nanosystems (LENA) started in 2015. Initiated by PTB, the QUANOMET Cooperation between the *TU Braunschweig* and *Leibniz Universität Hannover* – initially supported by the Federal State of Lower Saxony with €1.5 million annually for five years – was successfully called into life. QUANOMET is supposed to advance the connection between quantum metrology and nanometrology. In Berlin, a basic agreement with the Technical University will soon be completed. It is aimed at forming the foundation for initial joint appointments in the fields of medical imaging, secure grid connections of measuring devices and heat flow measurements. In 2016, under the slogan "*MetroSommer 2016 – Dein genauester Sommer*" (MetroSummer 2016 – Your most accurate summer) PTB is, for the first time, offering a summer program for students to excite excellent young scientists about metrology.

The European Metrology Programme for Innovation and Research (EMPIR) started successfully in 2015. In the first calls for research, PTB succeeded in acquiring approx. 30 % of the funds available for the 28 Member States. In the years from 2014 to 2020, a total of roughly €600 million is available to secure European metrology's leading international position. In the future, creating networks for metrology – and in particular for metrological services in Europe – will be essential. Here, networks, particularly those initiated and led by PTB, are trailblazing. There is, for instance, MATHMET which coordinates mathematics and statistics in metrology, along with TraCIM, a platform for Internet-based software validation for metrological evaluation algorithms.

As in the years before, PTB's researchers achieved very many outstanding results: For the first time ever it was possible to compare two optical clocks over large distances – to be exact between Braunschweig and Paris – with the highest accuracy worldwide. What is more, PTB's ytterbium ion clock is now ticking with a relative measurement uncertainty of only  $3 \cdot 10^{-18}$ , a figure which had not yet been reached internationally. These are both important steps in realizing the second up to one hundred times more precisely in the future. The smallest currents were measured with an accuracy which had previously been unattainable by counting individual electrons in single-electron pumps and by using ingenious error correction. The Planck constant was measured with the second lowest uncertainty in the world in the Avogadro project and work on determining the Boltzmann constant was advanced with great promise. In this way, PTB was able to maintain its key role in the upcoming revision of the International System of Units. High-precision measurement series at the Metrology Light Source (MLS) imaged molecular orbitals; magnetic resonance imaging (MRI) and measurements of magnetic signals visualized reactions at the brain's centers of hearing which were induced by actually "inaudible" infrasound.

While I was on several business trips abroad, I was able to assure myself once again of the highest level of recognition that PTB enjoys throughout the world. On the occasion of my visit to the National Metrology Institute in Thailand, more than a hundred guests from the fields of industry, research and metrology were invited to an event in the presence of the Minister of Science and Technology the German Consul and the Economic Attaché.

I would like to thank all staff members for their strong commitment and their effort, not least in the public presentation of PTB on the new Internet pages and at the "*IdeenExpo*" fair. All of you contribute to PTB acting at the forefront of metrological services and research nationally and internationally and thus to PTB living up to the demands stated in its "Agreement on Objectives".



Dieser gedruckte Teil des Jahresberichts liefert Ihnen in überschaubarer Form einen Überblick über die PTB im Jahre 2015. 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	8
Fachabteilungen • Scientific Divisions	8
Kuratorium • Advisory Board	26
Präsidium • Presidential Board	28
Qualitätsmanagement • Quality Management	32
Gesetzliches Messwesen • Legal Metrology	34
Technologietransfer • Technology Transfer	36
Technische Zusammenarbeit • Technical Cooperation	37
Presse- und Öffentlichkeitsarbeit • Press and Information Office	40
Akademische Abschlüsse • Academic Degrees	43
Promotionen • Doctorates	43
Diplom- und Masterarbeiten • (Master) Theses	44
Bachelorarbeiten • Bachelor Theses	46
Zahlen und Fakten • Figures and Facts	48
Berichte der Abteilungen	
Mechanik und Akustik	57
Elektrizität	73
Chemische Physik und Explosionsschutz	85
Optik	97
Fertigungsmesstechnik	109
Ionisierende Strahlung	121
Temperatur und Synchrotronstrahlung	133
Medizinphysik und metrologische Informationstechnik	153
Anhang	
Kuratorium	173
Organigramm	174
Arbeitsgebiete	176
Geländepläne	180

# Nachrichten des Jahres • News of the Year

## SI-Spitzenforschung: Uhren, Kilogramm und einzelne Elektronen

Das internationale Einheitensystem (SI) soll grundlegend reformiert werden. Das SI wird in Zukunft durch die Festlegung von sieben definierenden Konstanten gegeben sein, darunter die Planck-Konstante  $h$  und die Elementarladung  $e$ . Dies wird zurzeit eingehend vorbereitet – sowohl wissenschaftlich in den Laboratorien der nationalen Metrologieinstitute als auch wissenschaftspolitisch in den Gremien der Meterkonvention. Auch die Basiseinheiten Kilogramm und Ampere, die momentan noch über einen Artefakt (beim kg) bzw. über eine idealisierte Messvorschrift (beim A) definiert sind, lassen sich dann mit der Hilfe solcher Konstanten darstellen. (Für die Sekunde und den Meter ist dieser Bezug zu Naturkonstanten heute schon gegeben.) Die PTB arbeitet intensiv an entsprechenden hochpräzisen Darstellungsverfahren. Aller Voraussicht nach wird diese Reform auf der nächsten Generalkonferenz der Meterkonvention im Jahre 2018 beschlossen. Die Sekunde wird zwar ihre bisherige Definition (basierend auf einer Übergangsfrequenz im Cäsium) noch behalten. Aber an den Grundlagen einer zukünftigen Neudefinition der Zeiteinheit Sekunde basierend auf optischen Übergängen in Atomen oder Ionen wird in der PTB schon heute intensiv gearbeitet.

### Kilogramm

Für die Neudefinition und Realisierung des Kilogramms über Naturkonstanten verfolgt die PTB im Avogadroprojekt gegenüber den von einigen Ländern favorisierten Wattwaagenprojekten den Weg über das „Zählen“ von Atomen in Isotopenangereicherten Silizium-Einkristallen mithilfe der sogenannten X-Ray-Crystal-Density-Methode. Dabei wird durch Messung der Kristalleigenschaften (molare Masse, Gitterparameter und Verunreinigungskonzentration) sowie der Kugeleigenschaften (Masse, Volumen und Oberflächenschichten) die Avogadro-Konstante bestimmt, über die das Kilogramm zurückgeführt werden kann. Anfang 2015 veröffentlichte das internationale Avogadroprojekt (BIPM, INRIM, NMIJ, NIST, PTB) einen neuen Wert der Avogadro-Konstante:  $N_A = 6,022\ 140\ 76(12) \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ . Dieser Wert ist konsistent mit den Ergebnissen der Wattwaagenpro-

## SI top research: Clocks, the kilogram and single electrons

The International System of Units (SI) is to be fundamentally reformed. In future, the SI will be determined by seven defining constants, among them Planck's constant  $h$  and the elementary charge  $e$ . The base units the kilogram and the ampere, which are currently defined via an artifact (in the case of the kg) or via an idealized measurement instruction (in the case of the ampere), can then also be realized with the aid of such constants. (For the second and the meter, this reference to fundamental constants is already given today.) PTB is working intensively on corresponding high-precision realization procedures. Such a fundamentally newly formulated system of units is at present being prepared in detail – both scientifically in the laboratories of the national metrology institutes and also under scientific and political aspects in the committees of the Meter Convention. In all likelihood, this reform of the system of units will be adopted at the next General Conference of the Meter Convention in 2018. In this package of redefinitions, the second will still maintain its current definition (based on a transition frequency in cesium). PTB is, however, already intensively working on the foundations of a future redefinition of the unit of time, the second, which will be based on optical transitions in atoms or ions.

### The kilogram

For the redefinition and realization of the kilogram via fundamental constants, PTB is pursuing, within the scope of the international Avogadro Project, an approach by “counting” atoms in isotopically enriched silicon single-crystals using the so-called “X-ray Crystal Density (XRCD) method”. This is in contrast to the watt balance projects which are favored by some countries. Hereby, the Avogadro constant is determined by measuring the crystal properties (molar mass, crystalline lattice parameter, and impurity concentration) as well as the sphere properties (mass, volume, and surface layers) via which the kilogram can be traced. Early in 2015, the international Avogadro Project (BIPM, INRIM, NMIJ, NIST, PTB) published a new value of the Avogadro constant:  $N_A = 6.022\ 140\ 76(12) \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ . This value is consistent with the results of the watt balance projects and provides a relative uncertainty of  $2.0 \cdot 10^{-8}$  for the realization of the new kilogram.





Hochreiner Silizium-Einkristall mit einer Isotopen-Anreicherung von 99,998 %, aus dem die PTB zwei nahezu perfekte Kugeln für die Neudefinition des Kilogramm anfertigt.

High-purity silicon single-crystal with an isotope enrichment of 99.998 %, from which PTB is manufacturing two almost perfect spheres for the redefinition of the kilogram.

jekte und ergibt für die Darstellung des „neuen“ Kilogramms eine relative Unsicherheit von  $2,0 \cdot 10^{-8}$ .

Für das neue, inzwischen eigene Avogadroprojekt der PTB mit dem Ziel einer weiteren Absicherung der Messunsicherheit waren hochreine Silizium-28-Einkristalle mit einer Isotopen-Reinheit von 99,998 % notwendig. 2012 hatte die PTB hierfür mit der Außenhandelsgesellschaft ISOTOP in Moskau einen Vertrag über die Lieferung von zwei Silizium-28-Polykristallen mit je 6 kg abgeschlossen. Im „Electrochemical Plant“ in Zelenogorsk wurde zunächst natürliches festes Silizium in gasförmiges  $\text{SiF}_4$  umgewandelt. Die hochkomplizierte, monatelang andauernde Isotopenanreicherung zum  $^{28}\text{SiF}_4$  fand in den Gaszentrifugen des „Electrochemical Plant“ in Zelenogorsk statt. Das „Institut für die Chemie hochreiner Substanzen“ der Russischen Akademie der Wissenschaften in Nishniy Novgorod wandelte anschließend das Isotopen-angereicherte  $^{28}\text{SiF}_4$  aufwendig in Silan um, reinigte es in monatelangen Prozessen chemisch und erzeugte in speziell entwickelten Abscheidungsanlagen zwei 6 kg schwere  $^{28}\text{Si}$ -Polykristalle. Im August 2014 und im August 2015 wurde jeweils 6 kg polykristallines Material geliefert. Aus dem ersten Polykristall züchtete das Berliner „Leibniz-Institut für Kristallzüchtung“ einen Einkristall und übergab ihn am 25. März 2015 an die PTB. Der zweite Einkristall wird Anfang 2016 erwartet. Aus diesen Einkristallen sollen in der PTB mit höchster Präzision insgesamt vier Kugeln mit der Masse von jeweils rund 1 kg gefertigt werden. Inzwischen wurden auch in der PTB mit größtem Aufwand sämtliche notwendigen Messtechniken entwickelt.

Anfang 2015 schloss die PTB einen neuen Vertrag über die Lieferung von drei weiteren Isotopenangereicherten  $^{28}\text{Si}$ -Polykristallen mit je 6 kg, jetzt direkt mit den „Electrochemical Plant“ in Zelenogorsk. Geplant ist, dass die PTB spätestens 2018

PTB has meanwhile started an Avogadro project of its own which is aimed at a further validation of the measurement uncertainty and for which high-purity silicon-28 single-crystals with an isotopic purity of 99.998 % were required. For this purpose, PTB had, in 2012, concluded a contract for the delivery of two 6 kg  $^{28}\text{Si}$  polycrystals with the export trading company ISOTOP in Moscow. First of all, natural solid silicon was converted into gaseous  $\text{SiF}_4$  at the “Electrochemical Plant” in Zelenogorsk. The highly complicated isotope enrichment to  $^{28}\text{SiF}_4$  (which took several months) was performed in the gas centrifuges at the “Electrochemical Plant” in Zelenogorsk. In sophisticated processes, the “Institute of Chemistry of High-Purity Substances” of the Russian Academy of Sciences in Nishniy Novgorod finally converted the isotopically enriched  $^{28}\text{SiF}_4$  into silane, purified it chemically over several months, and fabricated two  $^{28}\text{Si}$  polycrystals (weight: 6 kg each) in specially developed deposition plants. In August 2014 and in August 2015, 6 kg each of polycrystalline material were delivered. From the first polycrystal, the “Leibniz Institute for Crystal Growth” in Berlin grew a single-crystal which was handed over to PTB on 25 March 2015. The second single-crystal is expected early in 2016. From these single-crystals, a total of four spheres with a mass of approx. 1 kg each are to be manufactured at PTB with the highest precision. Meanwhile, all the necessary measuring techniques have also been developed at PTB with the greatest time and effort.

Early in 2015, PTB concluded a new contract – this time directly with the “Electrochemical Plant” in Zelenogorsk – for the delivery of three further isotopically enriched  $^{28}\text{Si}$  polycrystals of 6 kg. The plan is that PTB will have a total of ten (10) 1 kg  $^{28}\text{Si}$  single-crystal spheres at its disposal by 2018 at the latest. An even higher accuracy of the Avogadro constant is thus expected. This is important, as the accuracy

über insgesamt zehn  $^{28}\text{Si}$ -Einkristallkugeln von je 1 kg verfügt. Hierdurch wird eine noch weit höhere Genauigkeit der Avogadro-Konstante erwartet. Dies ist wichtig, da die Genauigkeit der Masseinheit von größter industrieller Bedeutung ist.

### Ampere

Die direkte Darstellung der Basiseinheit Ampere im neuen SI erfolgt mit Quantenstromquellen, die einen mit einer Frequenz  $f$  getakteten Strom  $I$  einzelner Elektronen erzeugen:  $I = ef$ . Die PTB entwickelt eine sogenannte selbstreferenzierte Quantenstromquelle. Diese integrierte Quantenschaltung besteht aus in Serie geschalteten Halbleiter-Einzelelektronen-Stromquellen und metallischen Einzelelektronen-Detektoren möglichst hoher Bandbreite. Mit den Detektoren werden die Fehlereignisse des Einzelelektronen-Transports bestimmt, die aufgrund des stochastischen Charakters des Transportmechanismus unvermeidlich sind. Werden diese Fehler bei der Bestimmung des Stroms berücksichtigt, kann mit der Serienschaltung eine kleinere Unsicherheit erreicht werden als mit einer einzelnen Einzelelektronen-Stromquelle. Ziel der Arbeiten ist die direkte Darstellung des neuen Amperes durch die Erzeugung eines quantisierten Stromes im Bereich von 100 pA mit einer relativen Unsicherheit, die geringer ist als die Unsicherheit der Amperedarstellung im heutigen SI, also etwa  $10^{-7}$ .

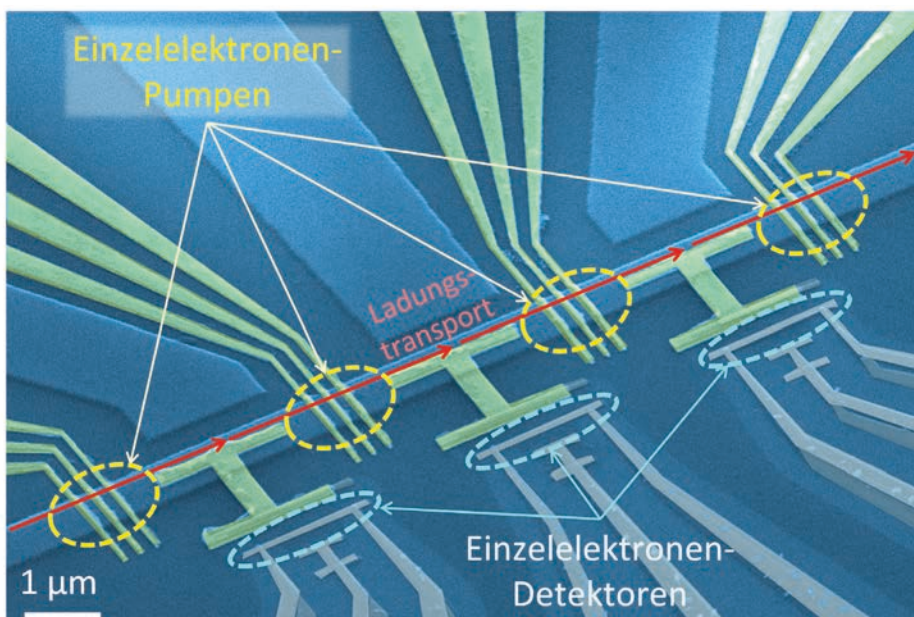
Dazu muss die Unsicherheit einer einzelnen Einzelelektronen-Stromquellen im Bereich von  $10^{-6}$  liegen. Diese Anforderung ist erfüllt, wie kürzlich durch eine direkte Messung des quantisierten Stromes mit

of the unit of mass is of the utmost significance to industry.

### The ampere

In the new SI, the base unit the ampere is directly realized with quantum current sources which generate a single-electron current  $I$  at a frequency  $f$ :  $I = ef$ . PTB is developing a so-called self-referenced quantum current source. This integrated quantum circuit consists of semiconductor single-electron current sources which are connected in series, and metallic single-electron detectors of as high a bandwidth as possible. The detectors are used to determine the errors of the single-electron transport which are unavoidable due to the stochastic character of the transport mechanism. If these errors are taken into account in the determination of the current, a smaller uncertainty can be achieved with the series connection than with an individual single-electron current source. The aim of the work is the direct realization of the new ampere by generating a quantized current in the range of 100 pA with a relative uncertainty which is smaller than the uncertainty of the ampere's realization in today's SI (i.e. approx.  $10^{-7}$ ).

For this purpose, the uncertainty of the individual single-electron current sources must lie in the range of  $10^{-6}$ . This requirement is met, as has recently been shown by a direct measurement of the quantized current with a newly developed, highly sensitive current amplifier. In addition, the bandwidth of the single-electron detectors must be increased to approx. 100 kHz. The so-called RF-SET detection method required for this purpose, in which a single-electron transistor is integrated into an oscil-



In der PTB entwickelter Prototyp einer selbstreferenzierten Quantenstromquelle mit vier in Reihe geschalteten Halbleiter-Einzelelektronen-Stromquellen („Einzelelektronen-Pumpen“) und drei metallischen Einzelelektronen-Detektoren.

Prototype of a self-referenced quantum current source developed at PTB with four semiconductor single-electron current sources (“single-electron pumps“) connected in series and three metallic single-electron detectors.

einem neu entwickelten hochempfindlichen Stromverstärker gezeigt wurde. Weiterhin muss die Bandbreite der Einzelelektronen-Detektoren auf etwa 100 kHz erhöht werden. Die dazu erforderliche sogenannte RF-SET-Detektionsmethode, bei der ein Einzelelektronen-Transistor in einen Schwingkreis integriert wird, wird zurzeit in der PTB etabliert. Erste RF-SET-Messungen konnten bereits demonstriert werden. Auch die verbesserte Bestimmung des quantisierten Stromes unter Berücksichtigung der gemessenen Fehlereignisse wurde mit einer integrierten Quantenschaltung aus drei Stromquellen und zwei Einzelelektronen-Detektoren demonstriert. Die Detektoren hatten allerdings eine geringe Bandbreite und die Schaltung wurde bei einer Frequenz von 30 Hz betrieben. Zur Erreichung des o. g. Ziels müssen fünf Einzelelektronen-Stromquellen und vier RF-SET-Detektoren in einer Schaltung integriert werden. Das stellt erhebliche Anforderungen an die Reproduzierbarkeit der zur Schaltungsfertigung eingesetzten Nanotechnologie. An der Optimierung der Fertigungstechnologie wird intensiv gearbeitet.

## Sekunde

Seit der Neudefinition der SI-Basiseinheit Sekunde im Jahr 1967 sind die primären Caesium-Atomuhren, die die Zeiteinheit „Sekunde“ realisieren, in jeder Dekade um etwa eine Größenordnung genauer geworden. Neuerdings sind allerdings optische Atomuhren, bei denen statt des Mikrowellenübergangs im Caesium eine scharfe Linie im optischen Spektralbereich mit einem Laser abgefragt wird, den besten Caesium-Atomuhren hinsichtlich Reproduzierbarkeit und Stabilität um Größenordnungen überlegen. Damit ergibt sich die Möglichkeit, zu gegebener Zeit die SI-Sekunde über einen geeigneten optischen Übergang zu definieren.

Gegenwärtig gibt es weltweit ein heißes Rennen darum, welche Technologie sich langfristig als die Methode der Wahl für eine Neudefinition erweisen wird: Einzelne Ionen, die in einer Radiofrequenzfalle gespeichert sind, oder viele Neutralatome, die in einem optischen Gitter gegen das Schwerfeld der Erde gehalten werden. Daher hat die PTB es sich zur Aufgabe gemacht, beide Technologien zu untersuchen und damit optische Atomuhren höchster Genauigkeit zu entwickeln.

Wichtige Ergebnisse des Jahres 2015 waren die Evaluation der  $\text{Yb}^+$ -Uhr mit einer systematischen Unsicherheit von  $3 \cdot 10^{-18}$  und der erstmalige Vergleich zweier optischer Gitteruhren mit Sr über eine Fa-

lating circuit, is currently being established at PTB. Initial RF-SET measurements have already been demonstrated. The improved determination of the quantized current has also been demonstrated (taking the measured errors into account) with an integrated quantum circuit composed of three current sources and two single-electron detectors. The detectors had, however, a small bandwidth and the circuit was operated at a frequency of 30 Hz. To achieve the above-mentioned goal, five single-electron current sources and four RF-SET detectors must be integrated in one circuit. This places considerable demands on the reproducibility of the nano-technology used for circuit manufacturing. Intensive work is being performed on the optimization of the manufacturing technology.

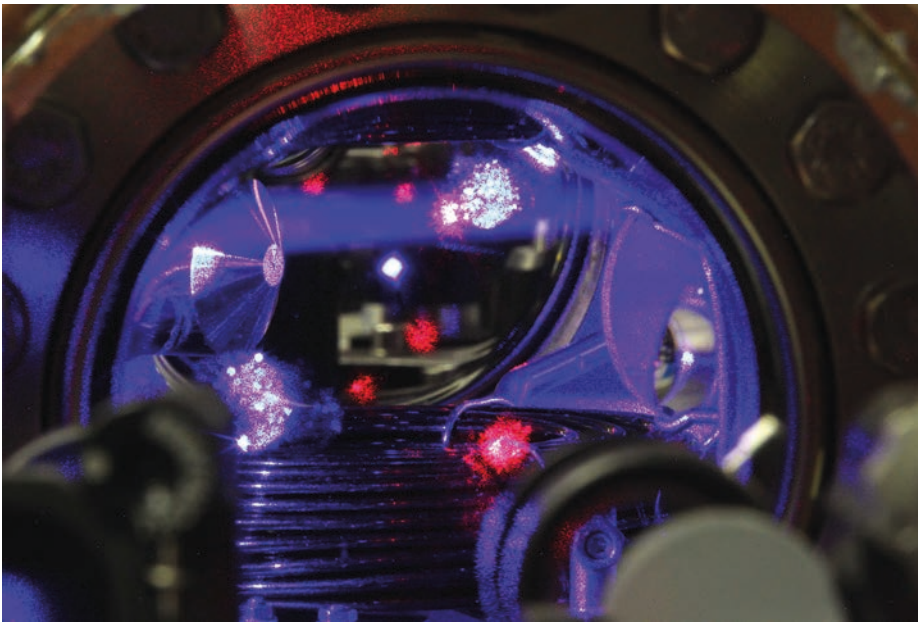
## The second

Since the redefinition of the second in the SI in 1967, the primary cesium atomic clocks, which realize the unit of time, the second, have become more exact by approximately one order of magnitude in each decade. Recently, however, the reproducibility and the stability of optical atomic clocks have become superior to the best cesium atomic clocks by orders of magnitude. In the case of these optical atomic clocks – instead of the microwave transition in cesium – a narrow line in the optical spectral range is interrogated with a laser. This opens up the possibility of defining the SI second – in due time – via a suitable optical transition.

At present, there is an exciting race worldwide about the question of which technology will, in the long term, prove to be the method of choice for a redefinition: Single ions which are stored in a radio-frequency trap – or many neutral atoms which are held in an optical lattice against the Earth's field of gravity. PTB has, therefore, made it its task to investigate both technologies and to develop optical atomic clocks of the highest accuracy which are at the top worldwide and to prepare the redefinition in this way.

Important results of the year 2015 were the evaluation of the  $\text{Yb}^+$  clock with a fractional systematic uncertainty of  $3 \cdot 10^{-18}$  and the first comparison of two optical lattice clocks with Sr via a fiber link between Braunschweig and Paris. PTB is only one of a few laboratories in the world which has an ensemble of different optical clocks at its disposal allowing reliable evaluations in the uncertainty range below that of primary cesium clocks to be performed in frequency comparisons.





Vorgekühlte Sr-Atomwolke mit einer Temperatur von wenigen milli-Kelvin. Nach einer Reduktion der Temperatur der Atome um einen weiteren Faktor 1000 durch Laserkühlung mit rotem Licht, dienen sie als Referenz in der Gitteruhr der PTB.

Pre-cooled Sr atomic cloud with a temperature of a few millikelvin. After the temperature of the atoms had been reduced by a further factor of 1000 by means of laser cooling with red light, they serve as a reference in the lattice clock of PTB.

serverbindung zwischen Braunschweig und Paris. Die PTB verfügt wie nur wenige Laboratorien weltweit über ein Ensemble unterschiedlicher optischer Uhren, das es erlaubt, in Frequenzvergleichen zuverlässige Evaluationen im Unsicherheitsbereich besser als mit primären Cäsiumuhren durchzuführen.

So wurde das Frequenzverhältnis der Yb-Einzelionenuhr und der Sr-Gitteruhr über einen Zeitraum von mehr als zwei Jahren mehrfach bestimmt, was Rückschlüsse auf Stabilität und Reproduzierbarkeit sowie Genauigkeit der beiden Uhren erlaubt. Gleichzeitig gibt diese Messung auch eine deutlich verbesserte Grenze für eine etwaige Drift fundamentaler Konstanten, die von den meisten Versuchen, die allgemeine Relativitätstheorie mit der Quantenmechanik zu verbinden, vorhergesagt wird. Mit diesen optischen Uhren besitzt die PTB die genauesten Messgeräte, die es erlauben, die grundlegenden Theorien zu testen und damit eventuell auch neue Physik zu entdecken.

The frequency ratio of the Yb single ion clock and of the Sr lattice clock has, for example, been repeatedly determined over a period of more than two years, which allows conclusions as to the stability and reproducibility and as to the accuracy of the two clocks to be drawn. At the same time, this measurement also provides a clearly improved limit for a possible drift of fundamental constants which is predicted by most of the tests which combine the general theory of relativity with quantum mechanics. With these optical clocks, PTB has the most accurate measuring instruments at its disposal which allow the fundamental theories to be tested and, thus – possibly – also new physics to be discovered.

## Rückführungen in Europa

Die PTB ist Mitglied in EURAMET, der europäischen Vereinigung der nationalen Metrologieinstitute. Ein wesentliches Ziel von EURAMET ist die Bereitstellung einer effizienten, international wettbewerbsfähigen Mess-Infrastruktur. Um dieses Ziel zu erreichen, gibt es vielfältige Aktivitäten innerhalb von EURAMET. Eine besteht darin, dass sich Institute für bestimmte Messgrößen und Messbereiche auf Institute aus anderen Ländern zurückführen. Auf das Vorhalten eigener nationaler primärer Normale kann dann verzichtet werden, wodurch Ressourcen europaweit effizient eingesetzt werden.

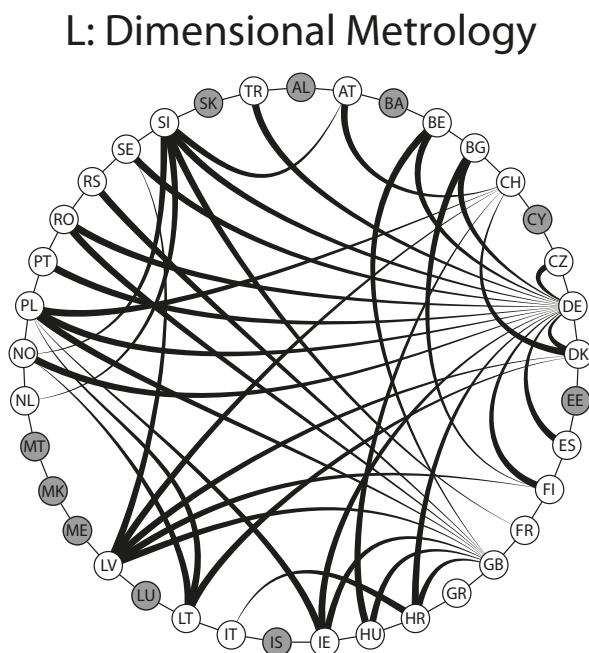
Der aktuelle Stand der Rückführungen in Europa wurde im vergangenen Jahr vom präsidentialen Stab der PTB erhoben. Dazu wurde als ausschließliche Datenquelle die Datenbank mit Schlüsselvergleichen (KCDB – key comparisons data base) des BIPM ausgewertet, die insgesamt 7951 Einträge aus Europa aufweist. In dieser Zahl nicht enthalten sind die Einträge des CCQM (Consultative Committee for Amount of Substance: Metrology in Chemistry and Biology), die aufgrund fachlicher Besonderheiten einer anderen Auswertung bedürfen. Für alle übrigen europäischen Einträge in der KCDB wurde mit einem automatischen Softwaretool die Quelle der Rückführung ermittelt. Diese Informationen wurden in Grafiken mit den Staaten aller EURAMET-Mitglieder zusammengefasst, sortiert nach dem vom BIPM verwendeten Länderkürzel. Eine sich verjüngende Verbindungslinie zwischen zwei Staaten repräsentiert mindestens eine Rückführung, wobei die Weitergabe vom dünneren zum dickeren Linienende erfolgt. Ein grauer Kreis symbolisiert die Tatsache, dass aus diesem Staat kein Eintrag in der KCDB vorliegt. Ein Kreis mit dem Länderkürzel ohne Verbindungslinie zeigt an, dass die Rückführung im eigenen Staat erfolgt. Solche Grafiken wurden für die metrologischen Disziplinen separat angefertigt, z. B. für die dimensionelle Metrologie oder den Durchfluss. Sie belegen eindrucksvoll das hohe Maß an Kooperation innerhalb von EURAMET.

## Traceability in Europe

PTB is a member of EURAMET, the European Association of National Metrology Institutes. One of EURAMET's essential goals is to provide an efficient, internationally competitive metrological infrastructure. A wide range of activities exist within EURAMET which are designed to meet this goal. One activity consists in having institutes trace certain measurands and measuring ranges to institutes in other countries. Individual countries then no longer have to maintain their own national primary standards, leading to an efficient use of resources throughout Europe.

Last year, the current status of traceability relations in Europe was investigated by PTB's Presidential Staff Office. To this end, the BIPM's key comparison database (KCDB), which features a total of 7,951 European entries, was analyzed as the sole data source. This number does not include entries from the Consultative Committee for Amount of Substance: Metrology in Chemistry and Biology (CCQM); these latter entries, due to their special technical characteristics, require a separate analysis. For all remaining entries in the KCDB, the provision of traceability between pairs of countries was determined using an automatic software tool. This information was compiled in diagrams which show all EURAMET member countries, sorted according to the country code used by the BIPM. A tapered line between two countries indicates that at least one institution in one of the countries provides traceability for the other; the direction of dissemination is from the thin to the thick end of the line. A gray circle symbolizes the fact that there is no entry from this country in the KCDB. A circle with a country code without a connecting line indicates that traceability is provided within that country or from outside EURAMET. Diagrams such as these were prepared separately for the metrological disciplines (e.g. dimensional metrology, flow rate). They are impressive evidence of the high degree of cooperation within EURAMET.

Diagramm L: Dimensional Metrology zeigt die Rückführungen in der dimensionellen Metrologie/Traceability relations in dimensional metrology. Es zeigt die Beziehungen zwischen den Mitgliedstaaten von EURAMET, sortiert nach dem vom BIPM verwendeten Länderkürzel. Die Linien stellen die Rückführungen dar, wobei die Richtung der Dissemination von der dünnen zur dicken Linie erfolgt. Ein grauer Kreis symbolisiert die Tatsache, dass es keine Einträge von diesem Land in der KCDB gibt. Ein Kreis mit dem Länderkürzel ohne Verbindungslinie zeigt an, dass die Rückführung im eigenen Staat erfolgt.



Rückführung in der dimensionellen Metrologie/Traceability relations in dimensional metrology

**Kann man Infraschall und Ultraschall hören?**

Lärm ist einer der wesentlichen Umweltfaktoren für die Beeinträchtigung von Gesundheit und Wohlergehen. Während jedoch der Umgang mit Lärm im Hörfrequenzbereich gut begründet und geregelt ist, fehlen bislang im Infraschall- und Ultraschallbereich sowohl das Verständnis für die Wahrnehmung als auch grundlegende Anforderungen an Messgeräte und praxisnah anwendbare Messvorschriften. In einem EMRP-Projekt wurde deshalb mithilfe verschiedener Methoden der Audiologie und bildgebender Verfahren der Neurologie objektiv untersucht, wie Infraschall (Frequenz  $f$  unter ca. 16 Hz bis 20 Hz), tieffrequenter Schall ( $f$  unter 125 Hz) und Ultraschall ( $f$  über 16 kHz) auf den Menschen wirken.

Zunächst wurden die subjektiven Hörschwellen einer Testpersonengruppe von 2 Hz (Infraschall) bis 125 Hz (Hörschall) und von 14 kHz (Hörschall) bis 24 kHz (Ultraschall) bestimmt. Danach wurde mithilfe der bildgebenden Verfahren untersucht, ob und in welchem Gehirnareal die akustischen Stimuli außerhalb des Hörfrequenzbereiches Reaktionen hervorrufen. Dieselben Probanden wurden mithilfe der Magnetoenzephalografie (MEG) und der funktionalen Magnetresonanztomografie (fMRT) untersucht. Im Tieffrequenz- und Infraschallbereich konnte bis hinab zu 8 Hz eine Aktivierung im auditiven Kortex nachgewiesen werden. Ein lokales Minimum bei 20 Hz legt die Vermutung nahe, dass sich der Mechanismus des Hörens möglicherweise bei etwa 20 Hz ändert, dass also Infraschall (unterhalb 16 Hz) und Hörschall (oberhalb 20 Hz) vom Gehirn auf unterschiedliche Art wahrgenommen bzw. verarbeitet werden. Im Ultraschallbereich (oberhalb 16 kHz) zeigten weder die MEG- noch die fMRT-Messungen eine Aktivierung im auditiven Kortex.

Mit seinen Ergebnissen hat das Projekt die Grundlagen für neue und bessere Messmethoden bereitgestellt, mit denen längerfristig auch besser begründete Expositionsobergrenzen festgelegt werden können.

Aktivität in einer waagerechten Schicht im Gehirn ausschließlich im Bereich des auditiven Cortex; die verschiedenen Farben zeigen Stimulusfrequenzen zwischen 8 Hz und 250 Hz.

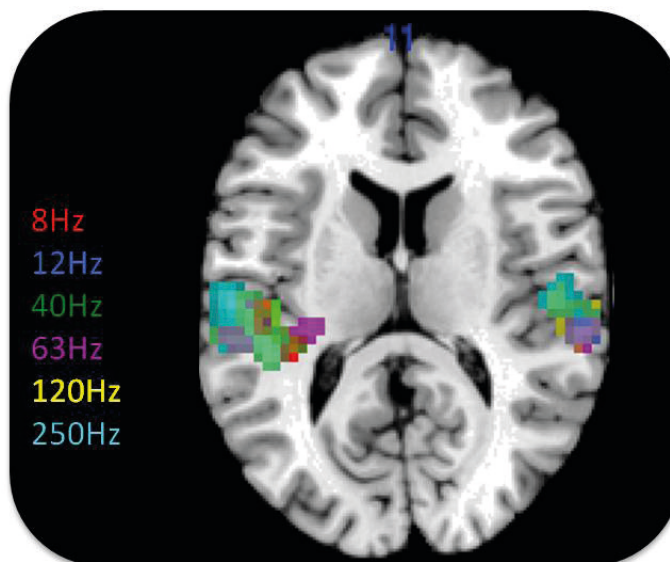
**Are infrasound and ultrasound audible?**

Noise is one of the fundamental environmental factors impairing health and well-being. Whereas in the acoustic frequency range the handling of noise is well grounded and regulated, in the infrasound and the ultrasound ranges not only is the understanding of perception lacking but also fundamental requirements for measuring instruments as well as applicable, practice-related measurement instructions. In an EMRP project, it was therefore objectively investigated by means of different methods of audiology and by means of neurologic imaging procedures, how infrasound (frequency  $f$  below approx. 16 Hz to 20 Hz), low-frequency sound ( $f$  below 125 Hz), and ultrasound ( $f$  above 16 kHz) affect human beings.

Initially, the subjective hearing thresholds of a subject group were determined from 2 Hz (infrasound) to 125 Hz (audible sound), and from 14 kHz (audible sound) to 24 kHz (ultrasound). Then, imaging procedures were used to examine whether and in which brain area the acoustic stimuli caused responses. The same test subjects were examined by means of magnetoencephalography (MEG) and functional magnetic resonance imaging (fMRI). In the low-frequency and the infrasound range, an excitation in the auditory cortex could be detected down to 8 Hz. A local minimum at 20 Hz suggests that possibly the mechanism of hearing might change at about 20 Hz, meaning that infrasound (below 16 Hz) and audible sound (above 20 Hz) are perceived and/or processed differently by the brain. In the ultrasound range (above 16 kHz), neither the MEG measurements nor the fMRI measurements showed activation in the auditory cortex.

With its results, the project has provided the foundations for new and better measurement methods

with which it is possible to lay down more well-founded upper exposure limits in the long term.



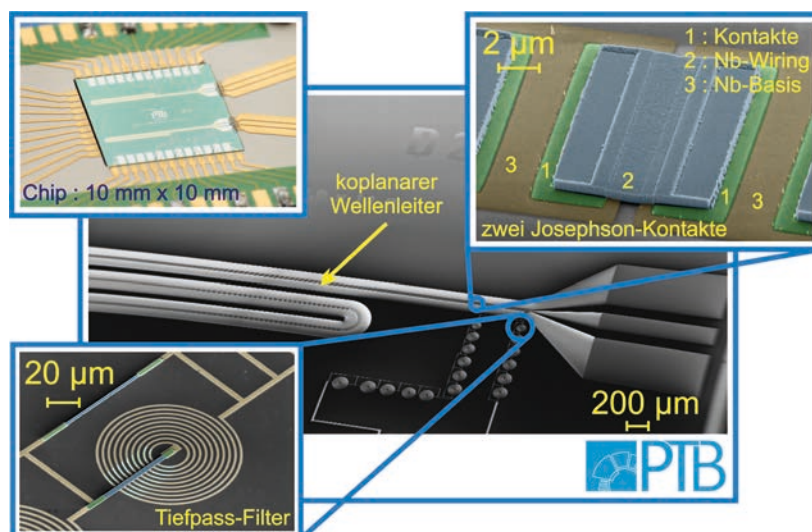
Activity in a horizontal layer in the brain, exclusively in the area of the auditory cortex; the different colors show stimulus frequencies ranging from 8 Hz to 250 Hz.



## Hochpräzises pulsgetriebenes AC-Josephson-Spannungsnormale bis 1 V

Die Ausgangsspannung eines pulsgetriebenen AC-Josephson-Spannungsnormals konnte 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. Derartige Spannungsnormale ermöglichen die Erzeugung spektral reiner, beliebiger Wellenformen und werden deshalb auch als Josephson Arbitrary Waveform Synthesizer (JAWS) bezeichnet. Wesentliche Komponente eines JAWS sind Reihenschaltungen aus SNS-Josephson-Kontakten, die im Reinraumzentrum der PTB basierend auf  $\text{Nb}_x\text{Si}_{1-x}$ -Barrieren in einem komplexen Mehrlagen-Dünnschicht-Prozess hergestellt werden. Aufgrund der extrem stabilen und reproduzierbaren Abscheidebedingungen können einzelne Schichten angepasster und wohldefinierter Dicke gefertigt werden, wodurch erstmals an der PTB dreifach gestapelte Josephson-Kontakte (d. h. vier Nb- und drei  $\text{Nb}_x\text{Si}_{1-x}$ -Schichten) erfolgreich mit hoher Fertigungsausbeute prozessiert werden konnten. Auf einem Chip von  $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$  sind zwei Schaltungen mit jeweils bis zu 9000 Josephson-Kontakten integriert. Durch Kombination von acht Schaltungen auf vier Chips konnten insgesamt 63 000 Josephson-Kontakte in Serie geschaltet werden. Bei der Erzeugung von Sinuswellen mit einer Ausgangsspannung von 1 V wird eine herausragende spektrale Reinheit (Signal-Rausch-Verhältnis besser als 120 dB) erreicht. In einem (weltweit erstmaligen) Präzisionsvergleich mit einem AC-Quantenvoltmeter konnte eine exzellente Übereinstimmung von  $(3,5 \pm 11,7)\text{ nV/V}$  bei einer Frequenz von 250 Hz gezeigt werden. Für die Zukunft eröffnen Effektivspannungen von 1 V eine Vielzahl von neuen Anwendungsmöglichkeiten des JAWS im Bereich der elektrischen Wechselspannungsmetrologie.

Rasterelektronen-Mikroskop-Aufnahmen einer JAWS-Schaltung mit einzelnen Details der Schaltung und Foto des auf einem speziellen Chip-Carrier kontaktierten JAWS-Chips.



## High-precision pulse-driven AC Josephson voltage standard up to 1 V

By the triple stacking of Josephson junctions and by the series connection of eight circuits with a total of 63 000 junctions, the output voltage of a pulse-driven AC Josephson voltage standard could be increased to an effective value of 1 V. Such voltage standards allow spectrally pure, arbitrary waveforms to be generated and are, therefore, also referred to as Josephson Arbitrary Waveform Synthesizers (JAWS). An essential component of a JAWS are series arrays composed of SNS Josephson junctions which are manufactured in PTB's Clean Room Center on the basis of  $\text{Nb}_x\text{Si}_{1-x}$  barriers in a complex multilayer thin-film process. The extremely stable and reproducible deposition conditions allow single layers of adapted and well-defined thickness to be manufactured which allowed Josephson junctions – which are stacked three times (i.e. four Nb- and three  $\text{Nb}_x\text{Si}_{1-x}$ -layers) – to be successfully processed at PTB for the first time with a high fabrication yield. On a chip ( $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ ), two circuits with up to 9000 Josephson junctions each can be integrated. By combining eight circuits on four chips, a total of 63 000 Josephson junctions could be connected in series. The generation of sine waves with an output voltage of 1 V and an outstanding spectral purity (signal-to-noise ratio better than 120 dB) is achieved. In a (worldwide unique) precision comparison with an AC quantum voltmeter, an excellent agreement of  $(3.5 \pm 11.7)\text{ nV/V}$  could be demonstrated at a frequency of 250 Hz. For the future, effective voltages of 1 V open up a great number of new application possibilities for the JAWS in the field of electrical AC voltage metrology.

Scanning electron microscope images of a JAWS circuit with individual details of the circuit, and a photo of the JAWS chip, contacted on a special chip carrier.

### Optische Feuchtemetrologie für die internationale meteorologische Spitzenforschung

Wasserdampfmessungen zählen zu den wichtigsten, aber auch schwierigsten Messungen an Bord von Forschungsflugzeugen. Während der letzten fünf Jahre wurden an der PTB, teilweise in Kooperation mit dem Forschungszentrum Jülich, zwei vollkommen neue Hygrometer-Gerätfamilien („SEALDH“ und „HAI“) entwickelt, die dank konsequenter metrologischer Rückführung zuverlässigere Messdaten versprechen. Beide Gerätfamilien basieren auf der direkten Infrarot-Diodenlaser-Absorptionsspektroskopie (Direct Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy, dTDLAS), die mit einer sogenannten „First-principles“-Auswertemethode kombiniert wurde. Das bedeutet vor allem, dass die beiden Hygrometer keine Kalibrierung mit Referenzgasen benötigen. Stattdessen werden die Werte mittels eines vollständigen physikalischen Modells ermittelt. Schlüsselfaktoren zur Umsetzung waren die langjährige Erfahrung mit dTDLAS-Systemen, die umfangreiche, über nahezu zwei Jahre durchgeführte Validierung des Messprinzips an den Feuchte-Primärgeneratoren der PTB und die Nutzung rückgeführter Spektraldaten der PTB. Mittlerweile wurden vier dTDLAS-Systeme realisiert, die bereits vier nationale Flugkampagnen auf einem Learjet 35A (ca. 50 Flugstunden) und vier internationale Messkampagnen auf einer Gulfstream G550 (ca. 300 Stunden) erfolgreich absolviert haben. Der Erfolg gründet sich auf vielerlei technische Detaillösungen, die auch im Flug metrologisch validierte Messunsicherheiten von 4,3 % relativ (bzw. min. 3  $\mu\text{mol/mol}$ ) erlauben, was in der Atmosphärenforschung bislang unerreicht ist. In Kombination aller metrologischen Erkenntnisse und Fähigkeiten sind damit erstmals, auch im Flug, rückgeführte Absolutergebnisse mit spektroskopischen Hygrometern möglich.

### Optical humidity metrology for cutting-edge international meteorological research

Water vapor measurements rank among the most important – but also the most difficult – measurements aboard research aircraft. During the past five years, PTB has been developing (partly in cooperation with Forschungszentrum Jülich) two completely new hygrometer instrument families (“SEALDH” and “HAI”) which – due to consistent metrological traceability – promise more reliable measurement data. Both instrument families are based on Direct Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy (dTDLAS), which was combined with a so-called “first principles” evaluation method. Above all, this means that the two hygrometers do not require any calibration by means of reference gases. Instead, the values are determined by means of a complete physical model. The key factors for implementation included: many years of experience with dTDLAS systems; the extensive validation of the measurement principle carried out over a period of almost two years at PTB’s primary humidity standards; and the use of PTB’s traceable spectral data. Meanwhile, four dTDLAS systems have been realized which have already successfully completed four national flight campaigns on a Learjet 35A (approximately 50 flight hours) and four international measurement campaigns on a Gulfstream G550 (approximately 300 hours). The success is based on manifold technical detailed solutions which permit – also in flight – metrologically validated measurement uncertainties of 4.3 % in relative terms, or at least 3  $\mu\text{mol/mol}$  which has so far been unattained in atmospheric research. For the first time, traceable absolute results can be achieved – also in flight – by means of spectrometric hygrometers by combining all metrological findings and capabilities available.

Hygrometer for Atmospheric Investigation.  
Hauptgerät mit sämtlicher Steuerelektronik,  
welches im Rumpf des Flugzeugs eingebaut  
wird.



*Literatur/Literature*  
B. Buchholz, N. Böse, and V. Ebert, “Absolute validation of a diode laser hygrometer via intercomparison with the German national primary water vapor standard,” *Applied Physics B*, vol. 116, no. 4, pp. 883–899, (2014), doi:10.1007/s00340-014-5775-4.

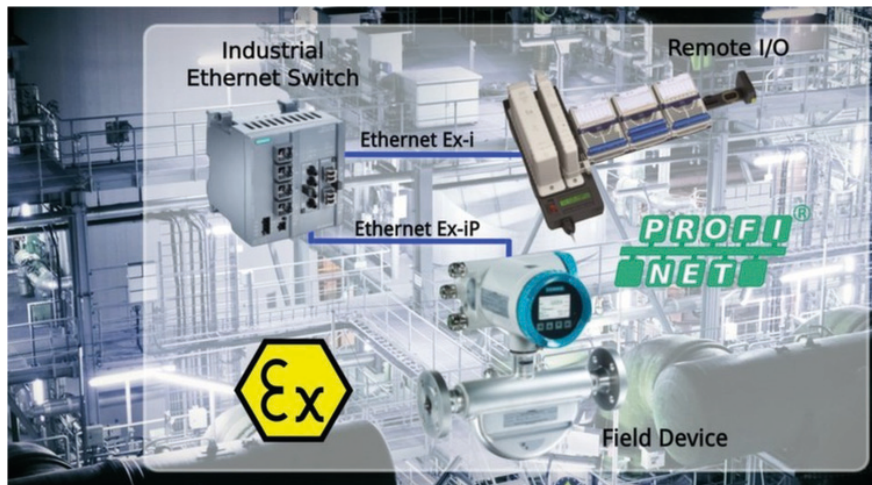
## Konzept für standardisiertes, eigensicheres Ethernet

Zur Verwirklichung von „Industrie 4.0“ auch in der Prozessindustrie stellen sich große technische Herausforderungen. In Zusammenarbeit der PTB mit den Firmen

R. Stahl, Siemens und ABB wurde ein Projekt gestartet, das klare Ziele für ein „Industrial Ethernet“ anpeilt: einfach einsetzbar in explosionsgefährdeten Bereichen mit Gerätespeisung, interoperabel mit unterschiedlichen Herstellern und ohne aufwendigen Eigensicherheitsnachweis.

Zwar gibt es bereits Lösungen für Ethernet in explosionsgefährdeten Bereichen, z. B. Remote I/O über Lichtwellenleiter, aber eine international standardisierte eigensichere Ausführung wie bei Feldbussen fehlte bisher. Aus diesem Grund hat sich eine Arbeitsgruppe unter Federführung der PTB die Aufgabe gestellt, ein eigensicheres Ethernet zu spezifizieren und dabei so nah wie irgend möglich an den verbreiteten Ethernet-Standards der IEEE 802.3 zu bleiben. Zwei unterschiedliche Ausprägungen eines eigensicheren Ethernets wurden definiert: Zur Anbindung von komplexeren Endgeräten ist die Ausführung „Ethernet Ex-i“ geeignet, die sehr hohe Übertragungsraten bis zu 1 GBit/s bei separater Energieversorgung unterstützt. Für einfachere Feldgeräte ist die Ausführung „Ethernet Ex-iP“ die geeignete Lösung. Nach Vorbild der 2-Leiter-Feldbusse erfolgt die eigensichere Speisung der Feldgeräte zusammen mit einer Full-Duplex-Datenübertragung (100 Mbit/s) über das Ethernet-Netzwerk, sodass keine separate Versorgung der Feldgeräte erforderlich ist. Neben konventionell eigensicherer Speisung stellt die Versorgung mit einer sogenannten Pseudo-Linearen Quelle („F4-i“) eine innovative und erfolversprechende Lösung dar. Dabei können einem angeschlossenen Gerät bis zu 4 W Nutzleistung (für Gasgruppe IIC und Sicherheitsfaktor 1.5) eigensicher bereitgestellt werden.

## Concept for standardized, intrinsically safe Ethernet



Realizing the aim of “Industry 4.0”, also in the process industry, will bring about great technical challenges. Within the scope of PTB’s cooperation with the companies R. Stahl,

Siemens and ABB, a project was launched which has clear aims for “Industrial Ethernet”: “Industrial Ethernet” should be easy to use in potentially explosive atmospheres; interoperability between various manufacturers should be possible, and no proof of extensive intrinsic safety should be required.

Although there are already solutions for the use of Ethernet in potentially explosive atmospheres (e.g. remote I/O via optical fibers), an internationally standardized, intrinsically safe version – as in the case of field busses – has so far been lacking. For that reason, a working group – under the auspices of PTB – has set itself the task of specifying intrinsically safe Ethernet, sticking as closely as possible to the usual Ethernet standards of IEEE 802.3. Two different versions of intrinsically safe Ethernet were defined: To connect more complex terminal devices, the version “Ethernet Ex-i” – which supports very high transmission rates of up to 1 GBit/s and has an independent energy supply – is suitable. For simpler field devices, the version “Ethernet Ex-iP” is appropriate. Based on the model of the 2-conductor field busses, the intrinsically safe supply of the field devices is realized via the Ethernet network, together with full-duplex data transmission (100 Mbit/s), so that no separate supply of the field devices is necessary. Besides the conventional intrinsically safe supply, a so-called pseudo-linear source (“F4-i”) is an innovative and promising solution. This enables a connected device to be supplied with a power output of up to 4 W (for Gas Group IIC and Safety Factor 1.5) in an intrinsically safe way.



### Weltrekorde bei zwei optischen Atomuhren

Optische Atomuhren gelten als die Uhren der Zukunft. Bei ihnen werden die als „Pendel“ wirkenden Atome resonant mit optischer Strahlung angeregt. Im Vergleich zu Cäsiumatomuhren, auf denen die SI-Basiseinheit Sekunde zurzeit beruht, ist ihre Anregungsfrequenz deutlich höher. Somit hat ihr Taktgeber eine viel höhere Resonanzgüte. Das bewirkt eine erheblich größere Genauigkeit (kleinere Abweichung von der wahren Frequenz) sowie höhere Stabilität (kürzere notwendige Mittelungszeit für eine Messung). Auf beiden Gebieten haben optische Atomuhren der PTB derzeit die Nase vorn.

Die Ytterbium- Einzelionenuhr der PTB ist mit einer relativen systematischen Messunsicherheit von nur  $3 \cdot 10^{-18}$  rund hundertmal genauer als die besten Cäsiumuhren und derzeit die genaueste Einzelionenuhr der Welt. Mit ihr erreichte erstmals eine Forschergruppe eine bereits 1981 aufgrund von theoretischen Überlegungen für eine optische Ionenuhr vorhergesagte Genauigkeit. Entscheidend war dabei die Kombination zweier Maßnahmen: Ein neuentwickeltes Verfahren ist in der Lage, die Anregung des Referenzübergangs gegen die Lichtverschiebung und deren mögliche Schwankungen zu immunisieren. Zudem konnte die von der thermischen Infrarotstrahlung der Umgebung induzierte Frequenzverschiebung mit einer Unsicherheit von nur 3 % bestimmt und korrigiert werden.

Im Gegensatz zu Ionenuhren verwendet eine Strontiumatomuhr ein Gas neutraler Atome, das durch Laserkühlung auf Temperaturen nahe dem absoluten Nullpunkt abgebremst wird. Danach wird ein extrem schmaler Übergang zwischen langlebigen Eigenzuständen der Atome angeregt, um die Frequenz des Anregungslasers auf jene der Atome zu stabilisieren. Die gleichzeitige Abfrage vieler Atome führt zu einem besonders hohen Signal-zu-Rausch-Verhältnis und somit einer höheren Stabilität. Mithilfe eines neu konstruierten Resonators, der zu den frequenzstabilsten der Welt zählt, ließ sich für den normalen Betrieb eine relative Instabilität von  $1,6 \cdot 10^{-16} / \tau^{1/2}$  als Funktion der Mittelungsdauer  $\tau$  in Sekunden ableiten. Dies ist der beste bislang für eine Atomuhr publizierte Wert.

Neben den Tests der „großen Fragen“ in der Grundlagenphysik ergeben sich mögliche Anwendungen höchstpräziser Uhren in der Geodäsie, wo sie – zusammen mit Faserverbindungen – eine direkte Messung von Höhenunterschieden im Gravitationspotenzial der Erde ermöglichen.

### World record for two optical clocks

Optical clocks are deemed the clocks of the future. In optical clocks, the atoms, which act as a “pendulum”, are resonantly excited by means of optical radiation. Compared to cesium atomic clocks – on which the SI base unit, the second, is currently based – their excitation frequency is much higher. Therefore, the resonance quality is much better. This implies considerably increased clock accuracy (i.e. lower deviation from the true frequency) and higher stability (i.e. shorter averaging period for one measurement). In both fields, PTB’s optical atomic clocks are currently one step ahead.

With a relative systematic measurement uncertainty of only  $3 \cdot 10^{-18}$ , PTB’s single-ion ytterbium clock is approximately a hundred times more accurate than the best cesium clocks and is currently the world’s most accurate single-ion clock. With this clock, a research group has, for the first time, attained an accuracy which had been predicted for an optical ion clock as early as 1981 based on theoretical considerations. The decisive aspect was the combination of two measures: firstly, a newly developed procedure which is able to immunize the excitation of the reference transition against the light shift and its possible variations. Secondly, the frequency shift induced by the thermal infrared radiation of the environment was determined with an uncertainty of only 3 % and corrected.

Contrary to ion clocks, a strontium clock uses laser cooling to slow a gas of neutral atoms down to temperatures near absolute zero. Then, an extremely narrow transition between long-lived eigenstates of the atoms is excited in order to stabilize the frequency of the excitation laser to that of the atoms. The simultaneous interrogation of numerous atoms leads to a particularly high signal-to-noise ratio and, thus, to higher stability. By means of a newly constructed resonator, whose frequency is among the most stable worldwide, a fractional instability in normal operation amounting to  $1.6 \cdot 10^{-16} / \tau^{1/2}$  was derived as a function of the averaging time  $\tau$  in seconds. This is the best published value for an atomic clock so far.

Apart from testing the „big issues“ of fundamental physics, possible applications of highest-precision clocks arise in geodesy where they enable – together with fiber connections – direct measurement of height differences in the gravitational potential of the Earth.

## Großverzahnungsringnormal mit 2 m Durchmesser

Im Rahmen eines vom BMWi geförderten Verbundprojektes ist in der PTB ein neues Verzahnungsnormal entwickelt worden. Es verkörpert je drei verschiedene Außen- und Innenverzahnungen, die auf einem Ring mit einem Außendurchmesser von etwa 2 m angebracht sind. In Kooperation mit dem Wissenschaftlichen Gerätebau der PTB wurde eigens für dieses Großverzahnungsnormal eine Auflagevorrichtung entwickelt und gefertigt, die eine möglichst geringe und vor allem reproduzierbare Durchbiegung des Normals gewährleistet. Die Kalibrierung des Normals erfolgte mit einem in der PTB entwickelten Verfahren, bei dem mit wenigstens vier im Raum verteilten selbstnachführenden Laserinterferometern, sogenannten LaserTracern, die lokalen Geometrieabweichungen eines Koordinatenmessgerätes auf Basis des Multilaterationsprinzips korrigiert werden. Die Auswertung der Messergebnisse erfolgt zurzeit. Die angestrebte Kalibrierunsicherheit für die einzelnen Verzahnungsparameter beträgt weniger als 4 µm.

Ziel des Projektes ist die Klärung messtechnischer Fragestellungen im Vorfeld der angestrebten Akkreditierung der ersten Konformitätsbewertungsstelle (KBS) für Großverzahnungen bei einem Projektpartner in Bremen durch die Deutsche Akkreditierungsstelle (DAkkS). Mit dieser und möglichen weiteren KBS soll zukünftig dem hohen Bedarf der fertigenden Industrie an großen Verzahnungsnormalen begegnet werden. Aktuell findet ein Ringvergleich an dem neuen Normal statt. An den Vergleichsmessungen beteiligen sich neben der PTB vier Messgerätehersteller, ein Hersteller großer Getriebebauteile, ein DAkkS-akkreditiertes Kalibrierlabor sowie ein Universitätsinstitut.

## Large gear ring standard, 2 m in diameter

Within the scope of a joint project promoted by the Federal Ministry for Economic Affairs and Energy (BMWi), a new gear measurement standard has been developed at PTB. It embodies three different external and three different internal gears each, which are arranged on a ring having an outer diameter of approximately 2 m. In cooperation with PTB's Scientific Instrumentation Department, a support has been developed and manufactured especially for this large gear measurement standard. This support guarantees as low a deflection as possible – and, in particular, a reproducible deflection – of the standard. The standard was calibrated by means of a procedure developed at PTB in the case of which the local geometry deviations of a coordinate measuring machine are corrected on the basis of the multilateration principle with at least four tracking laser interferometers (so-called "LaserTracers") distributed in the room. At present, the measurement results are being evaluated. The aimed-at calibration uncertainty for the individual gear parameters amounts to < 4 µm.

The aim of the project is to clarify metrological issues prior to the aimed-at accreditation of the first conformity assessment body for large gears at a project partner in Bremen through the German accreditation body (DAkkS). This conformity assessment body and other possible conformity assessment bodies (CABs) are to in future meet the high demands of the manufacturing industry for large gear measurement standards. Currently, an interlaboratory comparison is being performed on the new standard. In addition to PTB, four manufacturers of measuring instruments, a manufacturer of large gear components, a calibration laboratory as well as a university institute are participating in the comparison measurements.

Großverzahnungsringnormal mit einem Außendurchmesser von etwa 2 m. Auf dem Außen- bzw. Innenkreis sind je drei Verzahnungen mit unterschiedlichen Schrägungswinkeln (0°, 10° und 20°) angebracht. Das Normal wiegt ca. 2700 kg.



Large gear ring standard with an outer diameter of approximately 2 m. Arranged on the outer and on the inner circle are three gears each, with different helix angles (0°, 10° and 20°). The standard has a weight of approx. 2700 kg.



### Neustart der Alpha-Spektrometrie

Die Bestimmung der Aktivität von Alphastrahlern gehört wieder zum Leistungsangebot der PTB. Die früher bereits etablierte Methode wurde in Richtung  $\alpha$ -Spektrometrie unter definiertem Raumwinkel weiterentwickelt. Zwei Ziele stellen dabei einen erweiterten metrologischen Anspruch dar: Zum einen soll die Aktivität mit kleinstmöglichen Unsicherheiten weitergegeben werden können, zum anderen soll es möglich sein, radioaktive Verunreinigungen zu erkennen und Isotopengemische zu analysieren.

Die Bestimmung von Emissionsraten und Aktivitäten radioaktiver Quellen alphastrahlender Nuklide erfolgt durch die Messung der pro Zeit auf einen Detektor mit bekanntem Raumwinkel auftreffenden Alphateilchen. Aktuell werden relative Standard-Messunsicherheiten von 0,3 % erreicht. Diese Art der Aktivitätsbestimmung ist eine Absolutmethode in dem Sinne, dass zur Bestimmung aller notwendigen Kalibrierfaktoren nur Messungen notwendig sind, die auf den Basiseinheiten unseres Einheitensystems beruhen. Das sind in diesem Falle Zeit- und Längenmessungen.

Die erreichbare Messunsicherheit für eine Aktivitätsbestimmung mit diesem Messverfahren ist also wesentlich bestimmt durch die Genauigkeit, mit welcher der Geometriefaktor des benutzten Spektrometers berechnet werden kann. Für dessen Berechnung ist auch die quantitative Kenntnis der relativen Aktivitätsverteilung als Funktion des Ortes auf der Quellenoberfläche notwendig. Diese wird mit einem digitalen Radiografiesystem gemessen. Der Geometriefaktor wird dann mithilfe einer Monte-Carlo-Simulation berechnet, in welche die Abmessungen des benutzten Blendensystems und die gemessene Aktivitätsverteilung eingehen. Die Messeinrichtung enthält energiedispersive Detektorsysteme. Aus den gemessenen Impulshöhenverteilungen können dann mit geeigneten Rechnerprogrammen Informationen über die Güte der Quelle bezüglich des Energieverlustes der Alphateilchen in der Quelle und über die Radionuklidzusammensetzung gewonnen werden.

Alphaspektrometrie unter definiertem Raumwinkel

Alphaspectrometry with defined solid angle

### Re-start of alpha spectrometry

The determination of the activity of alpha emitters is on offer as one of PTB's services again. The method, which had already been established previously, has now been further developed towards  $\alpha$ -spectrometry under a defined solid angle. Thereby, two aims have been set which represent an increased metrological challenge: On the one hand, the activity should be disseminated with the smallest possible uncertainties, and on the other hand, it should be possible to detect radioactive impurities and to analyze isotopic mixtures.

The emission rates and the activities of radioactive sources of alpha-emitting nuclides are determined by measuring the alpha particles which impact per time on a detector with a known solid angle. Currently, relative standard uncertainties of 0.3 % are achieved. This kind of activity determination is an absolute method in the sense that – for the determination of all required calibration factors – only measurements which are based on the base units of our system of units must be performed. These are, in this case, time and length measurements.

The measurement uncertainty which can be achieved for an activity determination with this measurement procedure is, thus, essentially determined by the accuracy with which the geometry factor of the spectrometer that is being used can be calculated. The calculation of this factor also requires quantitative knowledge of the relative activity distribution as a function of the place on the source surface. This surface is measured with a digital radiography system. The geometry factor is then calculated with the aid of a Monte Carlo simulation. The dimensions of the diaphragm system used as well as the measured activity distribution enter into this simulation.

The measuring equipment contains energy-dispersive detector systems. From the measured pulse height distributions, information on the quality of the source with regard to the energy loss of the alpha particles in the source, and on the radionuclide composition can then be gained with suitable computer programs.



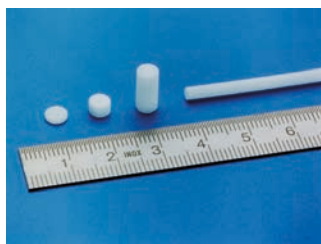
## Dosimetrie an kombinierten MR-Bestrahlungsgeräten

Moderne Methoden der externen Strahlentherapie haben zum Ziel, die Bestrahlungsparameter so zu wählen, dass eine möglichst große Wirkung im Tumorgebiet erzielt und umliegendes, gesundes Gewebe optimal geschont wird. Diese Dosiskonformität im Zielgebiet wird erst durch den Einsatz bildgebender Verfahren möglich. Durch die Kombination eines Bestrahlungssystems mit einem bildgebenden Verfahren wie der Magnetresonanztomografie (MRT) wird es möglich, auf zeitliche Änderungen der Anatomie einzugehen. Diese Neuentwicklung kann die Erfolgchancen einer Strahlentherapie verbessern, z. B. bei der Bestrahlung von Tumoren, die sich aufgrund von Atmung oder Herzschlag stark bewegen. Die MR-geführte Strahlentherapie bringt aber auch eine Reihe neuer Herausforderungen mit sich. Ein konkretes Beispiel dafür stellt die Dosimetrie in kombinierten MR-Bestrahlungsgeräten dar.

Das Ansprechvermögen von Detektoren, die üblicherweise in der Dosimetrie für die Strahlentherapie verwendet werden, verändert sich durch das Magnetfeld des MRT. Für die Qualitätssicherung hat dies zur Folge, dass Dosimetrieprotokolle und darin spezifizierte Unsicherheiten nicht ohne Weiteres anwendbar sind. Ein sicherer Einsatz von MR-Bestrahlungsgeräten zur Routinebehandlung von Patienten ist daher nicht möglich. Die PTB will dazu beitragen, diese Situation zu verbessern und letztlich eine rückführbare Dosimetrie an MR-Bestrahlungsgeräten zu ermöglichen. Zu diesem Zweck engagiert sich die PTB in deutschen und europäischen Forschungsvorhaben. Ein DFG-Projekt wird Untersuchungen mit Alanintabletten als Dosisdetektoren beinhalten, die mit Elektronenspinresonanz (ESR) ausgewertet werden. An dem Projekt sind die Fachbereiche „Dosimetrie für Strahlentherapie und Röntgendiagnostik“ und „Medizinische Messtechnik“ beteiligt.

Auf der linken Seite sind verschiedene Formen von Alanindetektoren abgebildet. Zur Dosimetrie in kombinierten MR-Bestrahlungsgeräten sollen die tablettenförmigen Detektoren verwendet werden. Auf der rechten Seite ist das ESR-Spektrometer abgebildet, mit dem die Auswertung der Alanindetektoren erfolgt.

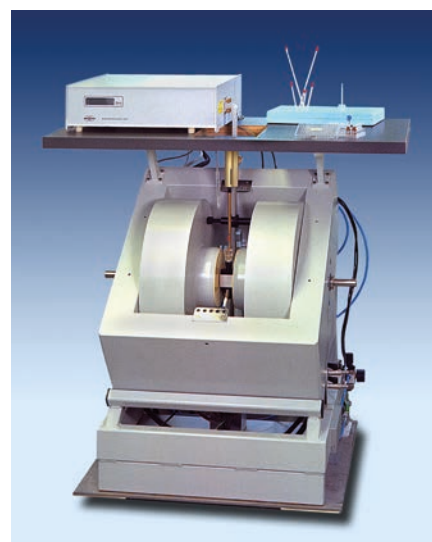
On the left, different forms of alanine detectors are shown. For dosimetry in combined MR irradiation devices, the palette-shaped detectors are to be used. On the right, the ESR spectrometer is shown which is used to evaluate the alanine detectors.



## Dosimetry for combined MR irradiation devices

Modern methods of external radiation therapy are aimed at selecting the irradiation parameters in such a way that as large an effect as possible is achieved in the tumor volume while the surrounding, healthy tissue is optimally protected. This dose conformity in the target volume becomes possible only by the use of imaging procedures. The combination of an irradiation system with an imaging procedure – such as magnetic resonance tomography (MRT) – allows time-dependent changes of the anatomy to be taken into account. This new development can improve the chances of success of radiation therapy, e.g. when tumors are irradiated which move strongly due to breathing or due to the heart beat. MR-guided radiation therapy, however, also brings about a series of new challenges. A concrete example of this is dosimetry in combined MR irradiation devices.

The response of detectors which are usually used in dosimetry for radiation therapy, changes by the magnetic field of the MRT. For quality assurance, a consequence of this is that dosimetry protocols and uncertainties specified in them are not directly applicable. Safe use of MR irradiation devices for routine treatment of patients is, therefore, not possible. PTB wants to contribute to improving this situation and, ultimately, to make traceable dosimetry on MR irradiation devices possible. To this end, PTB is engaged in German and European research projects. A DFG project will comprise investigations in which alanine pellets are used as dose detectors which are evaluated with electron-spin resonance (ESR). The Departments “Dosimetry for Radiation Therapy and Diagnostic Radiology” and “Medical Metrology” are participating in this project.



### PTB setzt Maßstäbe in der Terahertz-Radiometrie

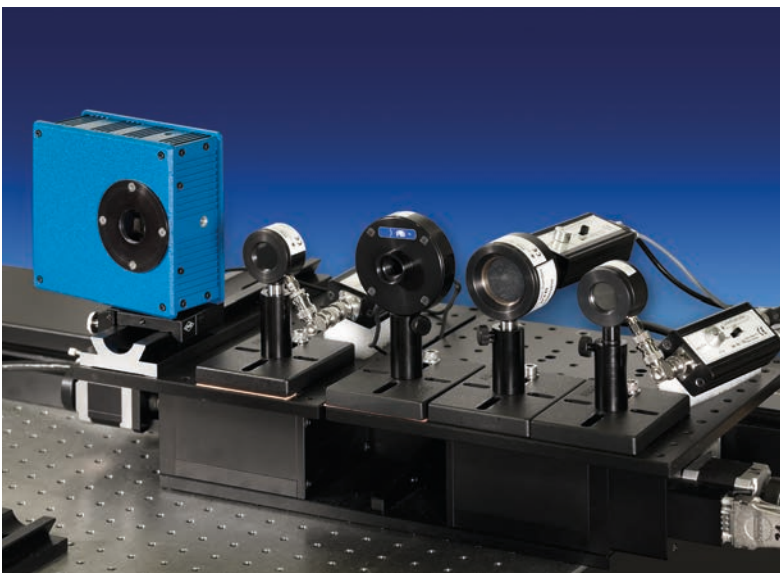
Der Spektralbereich zwischen der Infrarotstrahlung und den Mikrowellen wurde noch vor wenigen Jahren in der Strahlungsmesstechnik als „THz-Lücke“ bezeichnet, weil für Frequenzen um 1 THz die Strahlungsmesstechnik kaum entwickelt war. Mit der sich abzeichnenden zunehmenden Bedeutung der THz-Strahlung für die Prozessüberwachung und Sicherheitstechnik hat die PTB in ihrer Arbeitsgruppe „THz-Radiometrie“ in den vergangenen Jahren systematisch die quantitative Messung von THz-Strahlung aufgebaut und als Kalibrierdienstleistung von 1 THz bis 5 THz an Kunden in der ganzen Welt weitergegeben.

Diese Arbeiten haben im Jahr 2015 ein weiteres sehr wichtiges Zwischenergebnis mit der erfolgreichen Durchführung eines internationalen Pilotvergleichs zur THz-Leistungsmessung erreicht. Daran haben die nationalen Metrologieinstitute aus China und den USA teilgenommen, um in der PTB ihre THz-Radiometer mit denen der PTB zu vergleichen. Die resultierende sehr gute Übereinstimmung erlaubt der PTB, ihre Kalibrierdienstleistung mit optischen Methoden bis auf 0,7 THz auszudehnen. Dies ermöglichen neue THz-Detektoren, die in enger Kooperation mit einem deutschen Hersteller in den vergangenen zwei Jahren entwickelt und nun soweit verbessert wurden, dass erstmals die THz-Leistung eines Time-Domain-Spektroskopie-(TDS)-Systems absolut gemessen werden konnte. TDS-Systeme sind weltweit die Arbeitspferde im THz-Bereich, sie stehen kurz vor ihrem industriellen Einsatz und werden deshalb in der ersten VDI/VDE-Richtlinie des neu gegründeten VDI-Fachausschusses „THz-Systeme“ genau betrachtet.

### PTB sets benchmarks in terahertz radiometry

A few years ago, the spectral range between infrared radiation and microwaves was still called the “THz gap” in radiometry, because measuring techniques for frequencies around 1 THz were poorly developed. Then it became clear that THz radiation would gain in importance in process monitoring and safety engineering and PTB, with its THz Radiometry Working Group, decided to systematically develop the quantitative measurement of THz radiation and to pass it on to clients all over the world in the form of a calibration service for frequencies from 1 THz to 5 THz during the last couple of years.

In 2015, these activities arrived at another very important result with the successful performance of an international pilot comparison on THz power measurement. The other two participants were the national metrology institutes of China and the USA which wanted to compare their THz radiometers with PTB's. The excellent agreement resulting from this comparison has allowed PTB to extend its calibration services down to 0.7 THz with optical methods. New THz detectors have enabled this additional step; these were developed in collaboration with a German manufacturer over the past two years and have now been enhanced, so that the THz power of a time domain spectroscopy (TDS) system could be measured absolutely for the first time. All around the world, TDS systems are the “workhorses” in the field of THz; they are on the verge of being used for industrial applications and are therefore the main topic of the first VDI/VDE guidelines of the recently established VDI Committee “THz Systems”.



THz-Empfänger am Kalibriermessplatz der PTB

THz detectors at PTB's calibration facility

## Rekonstruktion von Molekülorbitalen in drei Dimensionen

Am Elektronenspeicherring Metrology Light Source (MLS) der PTB in Berlin-Adlershof ist es erstmals gelungen, die dreidimensionale Verteilung von Elektronen in Molekülen durch Elektronenspektroskopie sichtbar zu machen. Dazu wurden auf einer Metalloberfläche angeordnete Moleküle mit kurzweiliger Synchrotronstrahlung bestrahlt und die Winkel- und Energieverteilung der über den photoelektrischen Effekt herausgelösten Elektronen gemessen. Das als Orbitaltomografie bezeichnete Verfahren wurde an der TU Graz und dem Forschungszentrum Jülich entwickelt und in Kooperation mit der PTB erstmals erfolgreich auf drei Dimensionen erweitert. Die Ergebnisse konnten insbesondere durch eine genaue radiometrische Charakterisierung der anregenden Strahlung erzielt und im Oktober 2015 in der Fachzeitschrift *Nature Communications* veröffentlicht werden.

Die Messungen wurden mit einem elektrostatischen Toroid-Elektronenspektrometer und monochromatisierter Undulatorstrahlung im Photonenenergiebereich von 14 eV bis 55 eV durchgeführt. An dem genutzten MLS-Strahlrohr ließ sich der Photonenfluss der anregenden Strahlung mit relativen Messunsicherheiten im Prozentbereich bestimmen. Dies ermöglichte erstmals die genaue Normierung von Datensätzen bei unterschiedlichen Photonenenergien und -flüssen. So konnten nicht nur wie bisher die relativen Photoelektronenintensitäten als Funktion der Richtung des Elektronenimpulses zweidimensional über die Winkelverteilung gemessen werden, sondern auch in Erweiterung auf die dritte Dimension als Funktion des Impulsbetrages durch Variation der Photonenenergie und damit der Elektronenenergie. Aus der ermittelten dreidimensionalen Impulsverteilung der Photoelektronen ließ sich anschließend die dreidimensionale Ortsverteilung der Elektronen des ursprünglichen Molekülorbitals direkt und ohne Modellierung numerisch bestimmen. Die durch die Einbindung metrologischer Verfahren gewonnenen grundlegenden Erkenntnisse über die Ladungsverteilung und Ausrichtung einzelner Moleküle ist von hoher Relevanz für die Entwicklung funktionaler Oberflächen, z. B. organischer Halbleitermaterialien auf metallischen Oberflächen, welche die Perspektive für photovoltaische Bauelemente mit gesteigerter Effizienz eröffnen. Umgekehrt stellt die Orbitaltomografie einen sehr interessanten metrologischen Ansatz der quantitativen Elektronenspektroskopie dar, da sich bei dieser Methode verlässliche Messunsicherheitsbudgets aufstellen lassen.

## Reconstruction of molecule orbitals in three dimensions

The three-dimensional distribution of electrons inside molecules was made visible for the first time at PTB's electron storage ring Metrology Light Source (MLS) in Berlin-Adlershof by means of electron spectroscopy. For this purpose, molecules which were aligned on a metallic surface were irradiated with shortwave synchrotron radiation, and the angle and energy distribution of the electrons that were detached by the photoelectric effect was measured. This procedure, which is called orbital tomography, was developed at TU Graz (Austria) and at Forschungszentrum Jülich (Germany); in cooperation with PTB, it was, for the first time, successfully extended to three dimensions. These results could be achieved especially by a precise radiometric characterization of the exciting radiation and were published in the scientific journal "Nature Communications" in October 2015.

The measurements were carried out with an electrostatic toroidal electron spectrometer and with monochromatized undulator radiation in the photon energy range from 14 eV to 55 eV. At the MLS beamline used, the photon flux of the exciting radiation can be determined with relative uncertainties on the order of one percent. This allowed datasets to be exactly normalized at various photon energies and photon fluxes for the first time. Thus, it was not only possible, as previously, to measure the relative photoelectron intensities as a function of the direction of the electron impulse in two dimensions via the angular distribution, but it was also extended to the third dimension as a function of the absolute impulse value by varying the photon energy – and thus the electron energy. From the three-dimensional impulse distribution of the photoelectrons thus obtained, the three-dimensional local distribution of the electrons of the original molecule orbital could be determined numerically – directly and without modeling. The fundamental findings on the charge distribution and on the orientation of individual molecules, which were obtained by means of metrological procedures, is highly relevant for the development of functional surfaces, e.g. of organic semiconductor materials on metallic surfaces, which open up new perspectives for photovoltaic components with increased efficiency. In turn, orbital tomography represents a very interesting metrological approach to quantitative electron spectroscopy, since this method allows reliable uncertainty budgets.



### Großgerät zur Verfolgung magnetischer Nanopartikel

An der Charité – Universitätsmedizin Berlin weihte Bundesforschungsministerin Prof. Dr. Johanna Wanka am 12.6.2015 ein in Deutschland entwickeltes Magnetic Particle Imaging (MPI)-Gerät ein, das von der Charité gemeinsam mit der PTB betrieben werden soll. Dieses Gerät wurde im Rahmen einer Großgeräteinitiative von der Deutschen Forschungsgemeinschaft mit knapp 4 Millionen Euro finanziert. Mit der MPI-Technik lassen sich mit hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung Bilder von der Verteilung magnetischer Nanopartikel im lebenden Gewebe oder im Blutfluss erzeugen.

Das Magnetic Particle Imaging wurde vor einigen Jahren von Philips erfunden. Grundlage sind die Signale der eingesetzten Tracer: ungiftiger magnetischer Eisenoxid-Nanopartikel, die injiziert werden und im Blutkreislauf transportiert werden. Da diese magnetischen Tracer auf ein eingestrahltes äußeres Magnetfeld mit einer nicht linearen Antwort reagieren, geben sie spezifische Signale ab, die vom MPI-Gerät in Echtzeit mit hoher Empfindlichkeit orts aufgelöst erfasst werden. So lässt sich beispielsweise der Blutfluss als Film mit wenigen ms zeitlicher Auflösung beobachten, um Herz-Kreislauf-Probleme zu untersuchen. Die Aufgabe der PTB ist die umfassende messtechnische Charakterisierung der neu zu entwickelnden Eisenoxid-Nanopartikel, die für eine genaue quantitative Interpretation der MPI-Bilder notwendig ist. Dazu werden verschiedene Messverfahren eingesetzt: Magnetsuszeptometrie, Magnetpartikelspektrometrie sowie die in der PTB entwickelte Magnetrelaxometrie. Zudem sollen auf der Basis mathematischer Modelle Simulationsrechnungen durchgeführt und mit experimentellen Untersuchungen verglichen werden.

### New equipment for tracking magnetic nanoparticles

At the Charité university hospital in Berlin on 12 June 2015, Prof. Dr. Johanna Wanka, Federal Minister of Education and Research, dedicated a magnetic particle imaging (MPI) device which is to be operated jointly by the Charité hospital and PTB. This device was funded with almost 4 million euros by the Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) within the Major Equipment Initiative programme. With the MPI technology, it is possible to generate images of the distribution of magnetic nanoparticles in living tissue or in the blood flow with high temporal and spatial resolution.

MPI was invented by the Philips company a few years ago. MPI is based on the signals of tracers: non-toxic iron oxide nanoparticles which are injected and are transported in the blood flow. Since these magnetic tracers react to an external magnetic field with a non-linear response, they emit specific signals which the MPI device can detect in real time, with high sensitivity and high spatial resolution. This enables, for example, the observation of the blood flow as a film with a temporal resolution of only a few ms in order to investigate cardiovascular problems. PTB's task is to provide a thorough metrological characterization of the iron oxide nanoparticles which are yet to be developed; this characterization is indispensable for an accurate quantitative interpretation of the MPI images. Various measurement procedures are used for this purpose: magnetic susceptometry, magnetic particle spectrometry as well as magnetic relaxometry – a procedure which was developed by PTB. In addition, numerical simulations are to be carried out on the basis of mathematical models and are subsequently to be compared with experimental investigations.

Die Einweihung des MPI-Scanners am 12.6.2015. von links: L. Trahms (PTB), J. Wanka (Bundesministerin für Bildung und Forschung), E. Braun (Philips), S. Krach (Staatssekretär für Wissenschaft Berlin), M. Taupitz (Charité), J. Ullrich (PTB)

Dedication of the MPI scanner on 12 June 2015 – from the left: L. Trahms (PTB), J. Wanka (Federal Minister of Education and Research), E. Braun (Philips), S. Krach (Secretary of State for Science, Berlin), M. Taupitz (Charité), J. Ullrich (PTB)



## MATHMET – Das Europäische Zentrum für Mathematik und Statistik in der Metrologie

Die PTB hat zusammen mit anderen europäischen Metrologieinstituten 2015 das „Europäische Zentrum für Mathematik und Statistik in der Metrologie (MATHMET)“ gegründet. Zielsetzung dieses Zentrums ist die Bildung eines europäischen Netzwerks, welches durch gemeinsame Forschung, Serviceangebote, Richtlinien und Kooperationen die für die metrologische Forschung in Europa benötigte, bestmögliche mathematische und statistische Expertise bereitstellt.

Insbesondere kleinere Metrologieinstitute sowie kleine oder mittelständische Unternehmen, die selbst keine mathematischen Gruppen haben, werden durch MATHMET in die Lage versetzt, auf mathematische und statistische State-of-the-art-Expertise zurückgreifen zu können. Dazu verbreitet MATHMET Leitfäden und validierte Software zu deren Anwendung. Gleichzeitig bietet MATHMET ein Forum für mathematische und statistische Fragestellungen und fördert den Austausch mit akademischen Einrichtungen sowie Industrie und Standardisierungsorganisationen durch gemeinsame Projekte und internationale Workshops und Konferenzen.

Die breite wissenschaftliche Zusammenarbeit auf europäischer Ebene wird durch MATHMET unterstützt, indem ein gemeinsames Internetportal zur Verbreitung wissenschaftlicher Arbeiten bereitgestellt wird, durch gemeinsame Forschungsaktivitäten der Mitglieder sowie durch Forschungsk Kooperationen mit akademischen Einrichtungen, Standardisierungsorganisationen und industriellen Partnern. Der Wissensaustausch zwischen den Mitgliedern wird durch wissenschaftliche Konferenzen, gemeinsame Publikationen und Gastaufenthalte aktiv gefördert.

## MATHMET – The European Centre for Mathematics and Statistics in Metrology

In 2015, PTB, together with other European metrology institutes, founded the “European Centre for Mathematics and Statistics in Metrology (MATHMET)”. Through joint research and joint service offers, guidelines and cooperation projects, this centre aims to create a European network which provides the best possible mathematical and statistical expertise to support and strengthen metrological research in Europe.

MATHMET will enable especially smaller metrology institutes as well as small or medium-sized enterprises which do not have specialized mathematical working groups themselves to access mathematical and statistical state-of-the-art expertise. To this end, MATHMET supplies guidelines and associated validated software for their application. At the same time, MATHMET offers a forum to discuss and collaborate on mathematical and statistical issues. Moreover, the Centre will promote exchanges with academic institutions, with industry and with standardization organizations by means of joint projects and international workshops and conferences.

MATHMET aims to broaden scientific cooperation on mathematics for metrology at the European level by establishing a joint Internet portal which is aimed at spreading scientific work. Moreover, the Centre will focus on the joint research activities of its members and research cooperation projects with academic institutions as well as with standardization organizations and partners from industry. The exchange of knowledge between the members is actively promoted by means of scientific conferences, joint publications and visits of guest researchers.



Teilnehmer des MATHMET Workshop 2014 an der PTB, Berlin

Participants at the 2014 MATHMET Workshop at PTB's Berlin Institute



### Sitzung des Kuratoriums der PTB

Das Kuratorium der PTB, zusammengesetzt aus hochrangigen Persönlichkeiten aus Wirtschaft, Wissenschaft und Eichbehörden, erfüllt eine wichtige Funktion als Beratungsgremium für die PTB und das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). Neben den unterjährigen Kontakten bei Bedarf stellt die jährliche Sitzung des Kuratoriums eine wichtige Gelegenheit dar, über die Ergebnisse und Ziele der PTB zu beraten. In diesem Jahr traf sich das Kuratorium dazu am 21. und 22. Mai 2015 in Braunschweig.

Traditionell beginnt das Programm mit Laborbesuchen, gefolgt von Vorträgen junger Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler der PTB. In diesem Jahr berichtete zunächst Dr. Sebastian Raupach über extrem präzise und schnelle Frequenzvergleiche zwischen Atomuhren an der PTB und in Paris unter Nutzung einer Faserverbindung. Dies ist ein entscheidender Schritt für die Weiterentwicklung optischer Uhren. Danach stellte Dr. Martin Stein das im Aufbau befindliche „Kompetenzzentrum Windenergie“ vor. Dort sollen geometrische Abmessungen und Formen von Großbauteilen (z. B. Zahnräder mit 4 m Durchmesser) präzise vermessen und Drehmomente bisher weltweit unerreichter Stärke (perspektivisch bis zu 20 MNm) metrologisch auf das internationale Einheitensystem zurückgeführt werden. Schließlich erläuterte Julia-Maria Osinga die gemeinsamen Arbeiten mit dem Heidelberger Ionenstrahl-Therapiezentrum HIT zur Darstellung der Wasser-Energiedosis von Kohlenstoff-Ionenstrahlen, die der Behandlungsoptimierung und dem Schutz der Patienten vor unnötiger Strahlenbelastung dienen. Diese Vorträge stießen auf sehr große Resonanz. Im Anschluss fanden sich die einzelnen Kuratoriumsmitglieder in kleinen Gruppen in den Abteilungen ein, um dort über spezifischere Themen zu beraten.

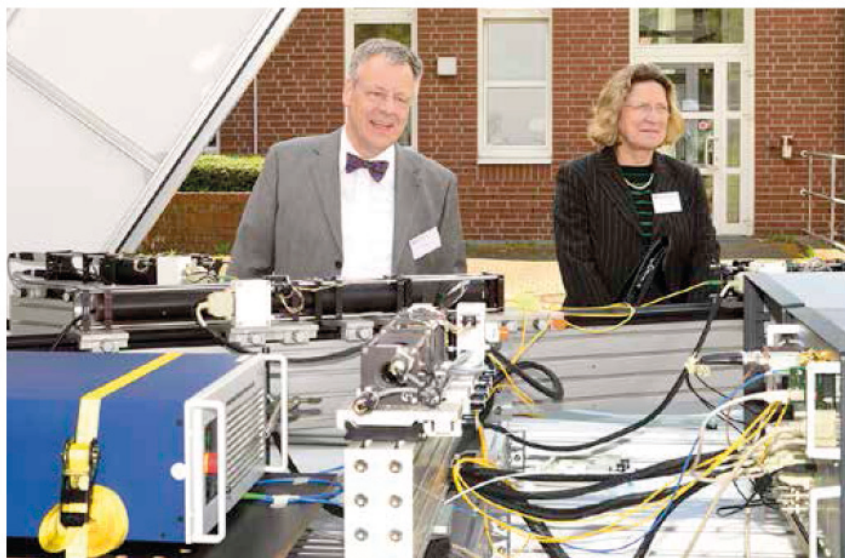
Das mobile LIDAR-System zu Messung der dreidimensionalen Windgeschwindigkeit an Windkraftstandorten stieß bei den Laborrundgängen auf großes Interesse.

The portable LIDAR system for measuring three-dimensional wind speed at wind energy locations attracted the interest of many visitors during the laboratory tours.

### Meeting of the Kuratorium (Advisory Board) of PTB

The Kuratorium of PTB, which is made up of high-ranking representatives from the fields of economics and science, as well as from verification authorities, fulfills an important function as an advisory committee to PTB and to the Federal Ministry for Economic Affairs and Energy (BMWi). In addition to meetings which take place as needed throughout the year, the annual meeting of the Kuratorium is an important opportunity to discuss PTB's achievements and goals. To this end, the Kuratorium met on May 21 and 22 of this year in Braunschweig.

Traditionally, the meeting begins with laboratory visits, followed by lectures given by young PTB scientists. This year, Dr. Sebastian Raupach first gave a report on extremely precise and rapid frequency comparisons between atomic clocks at PTB and in Paris using a fiber connection. This is a critical step in the further development of optical clocks. Next, Dr. Martin Stein presented the “Wind Energy Competence Center”, which is still under development. The mission of this competence center is to precisely measure the geometric dimensions and forms of large components (such as gears with a diameter of 4 meters) and to trace torques of a force previously unmatched anywhere in the world (long-term goal: up to 20 MNm) to the International System of Units using metrological methods. Finally, Ms. Julia-Maria Osinga outlined the collaborative efforts taking place with the Heidelberg Ion-Beam Therapy Center (HIT) on the realization of the absorbed dose to water of carbon ion beams; the goal of these efforts is to improve treatment and protect patients from unnecessary exposure to radiation. These lectures were met with a very positive response. Following this, small



Teilnehmer der Kuratoriums-  
tagung 2015Participants at the 2015  
Kuratorium meeting

Der nächste Morgen war der eigentlichen Tagung des Kuratoriums gewidmet. Der Präsident des Kuratoriums, MinDirig Stefan Schnorr, eröffnete die Sitzung mit einem Bericht über wichtige politische Entwicklungen im Zusammenhang mit dem Arbeitsgebiet der PTB, insbesondere die Umstrukturierung des Förderportfolios des BMWi für Technologietransfer sowie die Neuerungen durch das zum Jahresbeginn in Kraft getretene Mess- und Eichgesetz, welches der PTB weitere, insbesondere koordinierende Aufgaben zuteilt (siehe gesonderter Beitrag im vorliegenden Jahresbericht). Der Präsident der PTB, Professor Ullrich, stellte eine Auswahl der wesentlichen Ergebnisse der Arbeit der PTB vor, mit besonderem Schwerpunkt auf den Fortschritten in den Projekten, die der Vorbereitung der Neudefinition von Kilogramm, Mol und Ampere dienen, welche für 2018 geplant ist (siehe auch hierzu gesonderte Berichte in diesem Jahresbericht). Bei den metrologischen Dienstleistungen ist die PTB im Wesentlichen unverändert aktiv, ebenso in der Normung und im Technologietransfer. Die Vertiefung der Zusammenarbeit mit Universitäten schreitet voran, z. B. durch zwei gemeinsame Berufungsverfahren. Das neue europäische Metrologieforschungsprogramm EMPIR, welches von der EU mit 300 Mio. € etwa hälftig kofinanziert wird, ist angelaufen. Es tritt die Nachfolge des erfolgreichen Programms EMRP an, dessen letzte Projekte in den nächsten Jahren auslaufen werden, und legt einen zusätzlichen Fokus auf Innovationsaspekte und pränormative Forschung. Insgesamt zeigte sich das Kuratorium von den Leistungen der PTB und ihrer Aufstellung für die Zukunft sehr beeindruckt und ermunterte die PTB, in der eingeschlagenen Richtung fortzuschreiten.

groups of individual Kuratorium members met with the different divisions to discuss more specific topics.

The morning of the following day was dedicated to the actual conference of the Kuratorium. The President of the Kuratorium, Mr. Stefan Schnorr, Ministerialdirigent at the Federal Ministry for Economic Affairs and Energy, opened the conference with a report on notable political developments related to PTB's field of activity, particularly the restructuring of the BMWi's technology transfer funding portfolio; the report also addressed the reforms contained in the Measures and Verification Act, which took effect at the start of this year and which assigns additional responsibilities, in particular those concerned with coordination, to PTB (see separate article in this Annual Report). The President of PTB, Professor Ullrich, presented some of the significant accomplishments in the work of PTB, with particular emphasis on the progress made in projects whose goal is to prepare for the redefinition of the kilogram, the mole and the ampere which is planned for 2018 (here also see separate articles in this Annual Report). Generally speaking, PTB is as active in its metrological services as ever, as well as in its work in standardization and technology transfer. Collaboration with universities continues to intensify, such as in two joint professorial appointments. The new European metrology research program EMPIR has begun; this program is cofinanced by the EU, which contributes 300 million euros or around half its funding. It is the successor to the successful program EMRP, whose final projects are due to expire in the coming years, and places additional emphasis on innovation and pre-normative research. Altogether, the Kuratorium was highly impressed by PTB's accomplishments and position to meet future challenges, encouraging PTB to continue on the same course.



### Stärkung der Führungskultur in der PTB

Die im Jahr 2014 an der PTB durchgeführte Mitarbeiterumfrage hatte insgesamt ein sehr positives Gesamtbild vermittelt. Es zeigte sich jedoch auch, dass die Zufriedenheit der Beschäftigten gesteigert werden kann, wenn im täglichen Handeln einige Führungsaspekte, wie z. B. Kommunikation und Kooperation, stärker berücksichtigt würden. Das Präsidium der PTB hat dieses Umfrageergebnis aufgegriffen und entsprechende Maßnahmen eingeleitet.

Eine solche Maßnahme war der erste Führungskräfte-tag-plus, der am 4. Februar 2015 stattfand unter dem Motto „Erfolgreich und achtsam sich und andere führen – neue Impulse für Ihre Führungsrolle“. In Zusammenarbeit mit einer externen Unternehmensberatung gab es bei der ganztägigen Veranstaltung für über 100 Führungskräfte der PTB Vorträge, eine Podiumsdiskussion sowie einen Workshop, bei dem Gelegenheit zu einem offenen und konstruktiven Austausch bestand. Beim halbtägigen Führungskräfte-tag II am 30. Juni 2015 stand mit dem Beurteilungs-, Beförderung- und Höhergruppierungssystem ein weiteres Thema auf der Tagesordnung, das laut Mitarbeiterumfrage besserer Kommunikation bedarf.

Dem direkten Austausch zwischen PTB-Mitarbeitern und dem Präsidium dient das neu geschaffene Format des PTB-Forums. Dabei werden Themen, die vorab von Beschäftigten per Hauspost oder online eingereicht werden, in einem Vortrag und anschließend in einer moderierten Diskussion behandelt. Beim ersten der halbjährlich stattfindenden PTB-Foren stand das Thema der befristeten Beschäftigungen im Vordergrund. Der Präsident der PTB stellte zunächst dar,

### Strengthening PTB's Culture of Leadership

The outcome of the 2014 PTB staff survey was, all in all, very positive. Nevertheless, there was evidence that employee satisfaction could be improved if leadership factors such as communication and cooperation were given greater emphasis during day-to-day activities. The Presidential Board of PTB has responded to the survey's outcome by introducing appropriate measures.

One such measure was the first-ever Leadership Day Plus, which took place on 4 February 2015. The day's theme was "Being a Leader to Yourself and Others with Success and Mindfulness – New Ideas for Your Leadership Role". Held in collaboration with an external management consultancy firm, the all-day event for over 100 members of PTB's management staff included lectures and a panel discussion, as well as a workshop which gave participants the opportunity to exchange their views in an open and constructive way. The half-day-long "Leadership Day II" on 30 June 2015 included an additional topic that, according to the staff survey, requires better communication: the system of performance assessments and promotions.

A direct exchange between PTB employees and the Presidential Board was made possible by the new format of the PTB Forum: Topics submitted by employees in advance via PTB's internal mail or online are addressed in a presentation and a moderated follow-up discussion. The first semiannual PTB Forum devoted attention to the topic of fixed-term (temporary) employment contracts. The President of PTB first outlined the reasons why these employment contracts are fundamentally important for PTB and



Teilnehmer am Führungskräfte-tag-plus

Participants in the Leadership Day Plus

warum diese Beschäftigungen für die PTB und die Beschäftigten grundsätzlich wichtig sind, aber auch, welche Konsequenzen und Verantwortung daraus erwachsen. Den Fragen der PTB-Mitarbeiter stellten sich anschließend das gesamte PTB-Präsidium sowie die Leiterin des Personalreferats.

Ein weiterer Bestandteil des Maßnahmenpakets zur Verbesserung der Kommunikation betrifft die Auswahl der Führungskräfte. Zukünftige Führungskräfte mit entsprechender fachlicher Qualifikation müssen ihre sozialen und kommunikativen Kompetenzen ab sofort in einem Einzel-Assessment-Center nachweisen, das jeweils auf typische Situationen ausgerichtet ist und mit Unterstützung durch eine externe Personalberatungsfirma durchgeführt wird. Außerdem wurde ein Traineeprogramm zur gezielten Nachwuchsgewinnung aufgelegt, das mit den ersten beiden Trainees am 1.1.2015 gestartet wurde.

### **Ausbau der Vernetzung in der Wissenschaftslandschaft**

Die PTB ist über eine Vielzahl von Aktivitäten mit der Wissenschaftslandschaft vernetzt. Im vergangenen Jahr wurde dabei vor allem die Zusammenarbeit mit Einrichtungen der Regionen Braunschweig-Hannover und Berlin ausgebaut.

Die Kooperation zwischen PTB und TU Braunschweig im Rahmen der Metrologie-Initiative Braunschweig (MIB) bildet die Grundlage für eine intensive gemeinsame Forschung und Hochschulbildung im Bereich Metrologie. Das Spektrum der Zusammenarbeit reicht von gemeinsamen Forschungsprojekten und -zentren über gemeinsam betriebene Studiengänge und Graduiertenschulen bis hin zur Berufung von Leitungspersonal mit gemeinsamer Anbindung an beide Einrichtungen. Bislang wurden unter dem Dach der MIB der Studiengang „Messtechnik und Analytik“, die Graduiertenschule „Braunschweig International Graduate School of Metrology“ (B-IGSM), das Graduiertenkolleg „Metrology for Complex Nanosystems“ (NanoMet) sowie das Forschungszentrum „Laboratory of Emerging Nanometrology“ (LENA) eingerichtet.

Eine Initiative von PTB und B-IGSM war die mit Unterstützung des Helmholtz-Fonds e. V. durchgeführte internationale Metrologie-Sommerschule 2015, an der 70 Doktoranden und Doktorandinnen aus 18 verschiedenen Herkunftsländern teilnahmen. Die

its employees, but also the consequences and liability they entail. Questions from PTB employees were then responded to by the entire PTB Presidential Board as well as the director of the Personnel Section.

An additional measure implemented to improve communication concerns the selection of management staff members. Effective immediately, future management staff with corresponding professional qualifications will be required to demonstrate their social and communication skills in an individual assessment center session; the sessions each focus on different typical situations and are held by an external personnel consultancy company. Additionally, a trainee program was launched which is specifically designed to gain a new, younger generation of staff members; the program's first two trainees began work on 1 January 2015.

### **Expansion of networking activities in the scientific community**

PTB is integrated within the scientific community via a wide range of activities. This past year, collaboration with other institutions was expanded, particularly in the regions of Braunschweig-Hannover and Berlin.

The cooperation between PTB and TU Braunschweig within the scope of the Metrology Initiative Braunschweig (MIB) forms the foundation of intensive joint research and joint university study courses in the field of metrology. The collaboration efforts range from joint research projects and research centers to jointly administered courses of study and graduate schools, and even to appointing lecturers who are attached to both institutions. To date, the following undertakings have been established within the MIB: the “Metrology and Analytics” course of studies; the Braunschweig International Graduate School of Metrology (B-IGSM); the “Metrology for Complex Nanosystems” research training group (NanoMet); and the “Laboratory of Emerging Nanometrology” research center (LENA).

One initiative launched by PTB and B-IGSM was the 2015 Metrology Summer School, sponsored by the Helmholtz-Fonds e. V. (Helmholtz Association), which was attended by 70 doctoral candidates from 18 different countries. Six participants were from transitional and developing countries; their attend-



Teilnehmer an der internationalen PTB-Sommerschule 2015

Participants in the 2015 PTB International Summer School

Teilnahme von sechs Personen aus Schwellen- und Entwicklungsländern wurde vom Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung gefördert. Themenschwerpunkte der Veranstaltung lagen auf der Neudefinition der Einheiten und ihrer praktischen Realisierung sowie auf der Vermittlung metrologischer Kernkonzepte verbunden mit dem Ziel, wissenschaftlichen Nachwuchs aus den MINT-Fächern metrologisch weiterzubilden.

Ein weiterer wichtiger Baustein für die Vernetzung der PTB in der Wissenschaftslandschaft ist die Kooperation im Rahmen des Hannover Institut für Technologie (HITec). Erstmals in Europa werden dort Grundlagenforschung, angewandte Forschung und Technologieentwicklung auf dem Gebiet der Quantenphysik und Geodäsie unter einem Dach vereint. Kooperationspartner sind die Leibniz Universität Hannover, das Laser Zentrum Hannover e. V. (LZH), das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), das Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik/Albert-Einstein-Institut (AEI) sowie das Zentrum für angewandte Raumfahrttechnologie und Mikrogravitation (ZARM). Die Grundsteinlegung des Forschungsneubaus HITec fand am 27. Januar 2015 statt.

Auf Initiative der PTB ist es außerdem gelungen, im Rahmen des Masterplans für die Wissenschaftsallianz zwischen der Technischen Universität Braunschweig und der Leibniz Universität Hannover die Forschungslinie Quanten- und Nanometrologie (QUANOMET) zu etablieren. Damit wird dieses Thema, das in die Kernkompetenz der PTB fällt, neben den ebenfalls geförderten Lebenswissenschaften und der Mobilität zu einem großen Forschungsschwerpunkt in Niedersachsen. Die zugehörige Kooperationsvereinbarung wurde am 28. September 2015 unterzeichnet.

ance was sponsored by the Federal Ministry for Economic Cooperation and Development. The event focused on the redefinition of the units and their practical realization, as well as on the communication of core metrological concepts with the goal of training young scientists from STEM fields.

An additional important component of PTB's networking activities in the science community is the cooperation with the Hannover Institute of Technology (HITec). There, for the first time in Europe, basic and applied research and technology development on quantum physics and geodesy have been united under one roof. The partner organizations involved in this cooperation project are: Leibniz Universität Hannover (LUH); the Laser Zentrum Hannover e. V. (LZH); the German Aerospace Center (DLR), the Max Planck Institute for Gravitational Physics/Albert Einstein Institute (AEI); and the Center of Applied Space Technology and Microgravity (ZARM). The groundbreaking ceremony for the new HITec research building took place on January 27, 2015.

Furthermore, on the initiative of PTB, the quantum metrology and nanometrology research area (QUANOMET) was successfully established as part of the master plan for the scientific alliance between TU Braunschweig and Leibniz Universität Hannover. The establishment of QUANOMET has made this topic, which is part of PTB's core competence, a major focal point of research in Lower Saxony, along with life sciences, which also receive funding, and mobility. The cooperation agreement for this research area was signed on September 28, 2015.



## Erfolgreiche Auditierung als familienbewusste Arbeitgeberin

Die PTB hat sich im vergangenen Jahr erstmals dem Audit „berufundfamilie“ unterzogen. Festgestellt wurde dabei, dass die PTB bereits vor dem Audit über umfassende förderliche Rahmenbedingungen und Angebote zur Unterstützung der Vereinbarkeit von Beruf und Familie verfügte. Dazu gehören eine flexible, lebensphasenorientierte Arbeitszeitgestaltung mit individuellen Teilzeit- und Beurlaubungsregeln, alternierende Telearbeit, eine Kinderkrippe und Kindertagesstätte auf dem Betriebsgelände in Braunschweig, Eltern-Kind-Zimmer an beiden Standorten, betriebliches Gesundheitsmanagement und vieles mehr.

Für die Zukunft wurden beim Audit weitere Maßnahmen vereinbart, die – neben einem verbesserten Informationsangebot nach innen und nach außen – die Etablierung eines Familienbüros sowie die gezielte Unterstützung von Führungskräften bei der familien- und lebensphasenbewussten Führung umfassen.

Nach dem umfassenden Audit ist die PTB im Mai 2015 offiziell als familienbewusste Arbeitgeberin zertifiziert worden.

## Successful audit as a family-friendly employer

PTB underwent the “work and family audit” (audit “berufundfamilie”) for the first time last year. This ascertained that PTB already had comprehensive basic conditions which are beneficial for staff and that it offered support in combining work and family life before the audit took place. These things include the flexible organization of working time, matching the current stage of an employee’s life with individual regulations on part-time work and leave of absence, a combination of telework and work on-site at PTB, a day care center for babies of eight months up to kindergarten age children on the campus in Braunschweig, parent-child offices at both sites in Braunschweig and Berlin, workplace health management and much more.

Further measures were agreed for the future during the audit, which – apart from an improvement of the information provided both within PTB and externally – comprise the establishment of a Family Office as well as the targeted support of managerial staff in combining their management tasks with family life and in adapting their work life to the needs of a particular phase in life.

After the extensive audit, PTB was officially certified as a family-friendly employer in May 2015.



PTB-Vizepräsident Dr. Roman Schwartz (dritte Person von links) und Vertreter weiterer zertifizierter Organisationen bei der Übergabe des Zertifikats berufundfamilie

PTB’s Vice-President Dr. Roman Schwartz (third from left), and representatives of other certified organizations after having received the „berufundfamilie” (work and family) certificates

### **Anerkennung und Bewertung des Qualitätsmanagementsystems**

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 die in Ergänzung zu den in den Bundesoberbehörden geltenden gesetzlichen Regelungen die DIN EN 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 DIN EN ISO/IEC 17 065.

Die auf Grundlage der Kompetenznachweise vom Präsidenten der PTB abgegebene Selbsterklärung zum Qualitätsmanagement<sup>1</sup> wird uneingeschränkt durch die Auftraggeber und Nutzer der Leistungen der PTB anerkannt. 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<sup>2</sup>), des gesetzlichen Messwesens (OIML-MAA<sup>3</sup>) und im Bereich des Explosionsschutzes (IEC-Ex-Schema<sup>4</sup>) überzeugten sich internationale Teams von Fachexperten von der fachkompetenten Arbeit und erklärten ihr Vertrauen in ein wirksames QM der PTB.

Im Rahmen von Renotifizierungsverfahren im Zusammenhang mit erschienenen Neufassungen der EU-Richtlinien im Bereich der Messgeräte, der nichtselbsttätigen Waagen und des Explosionsschutzes (MID, NAWID, ATEX) wurden auf Grundlage des QM-Systems der PTB gegenüber den nationalen Benennungsbehörden entsprechende Kompetenznachweise erbracht.

### **Integration der Empfehlungen zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis**

Die 1998 veröffentlichten und im Jahr 2013 ergänzten Empfehlungen zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) sind seit 2001 im QM-System der PTB als verbindliche Handlungsweise für den gesamten Bereich der Forschung und Entwicklung in der PTB integriert. In diesem Jahr wurden zusätzlich im Zusammenwirken mit der „Ethikkommission der PTB“ die DFG/Leopoldina Empfehlungen

### **Recognition and assessment of the quality management system**

In 2015, PTB's technical quality management (QM) system, which is concentrated on its core services in calibration, measurements, testing, and metrological research and development, once again won unconditional recognition at home and abroad. Supplementary to the legal regulations that apply to higher federal authorities, the basis of this recognition was provided by: DIN EN ISO/IEC 17 025; the recommendations issued by the DFG (German Research Foundation) on good scientific practice; ISO Guide 34 in the field of chemistry; and DIN EN ISO/IEC 17 065 for PTB's activities as a conformity assessment body.

The self-declaration on quality management<sup>1</sup>, provided by the President of PTB on the basis of the demonstration of competence, has won the unconditional acceptance of the customers and users of PTB's services. This self-declaration is based on an annual self-assessment process ("review") which incorporates the results of internal audits and comparison measurements, along with the evaluation results of feedback provided by customers of PTB's services.

Within the scope of the implementation of international arrangements in the framework of the Metre Convention (CIPM-MRA<sup>2</sup>), of legal metrology (OIML-MAA<sup>3</sup>), and in the field of explosion protection (IECEx System<sup>4</sup>), international teams of experts examined the expert work done at PTB and declared their confidence in the efficiency of PTB's quality management system.

As part of renotification processes which took place in conjunction with the publication of new versions of the EU Directives on measuring instruments, non-automatic weighing instruments and explosion protection (MID, NAWID, ATEX), relevant proof of competence was provided to the national notification authorities on the basis of PTB's quality management system.

### **Integration of the recommendations for the safeguarding of good scientific practice**

The recommendations of the Deutsche Forschungsgemeinschaft (German Research Foundation, DFG), which were published in 1998 and supplemented in 2013, have been integrated in PTB's quality management system since 2001 as a binding code of conduct for the entire domain of research and development

zur Wissenschaftsfreiheit und Wissenschaftsverantwortung im Umgang mit sicherheitsrelevanter Forschung zur sogenannten „Dual-Use-Problematik“ diskutiert sowie Maßnahmen und Strukturen zur Risikominimierung zum Missbrauch von Forschungsergebnissen im Rahmen des QM-Systems für verbindlich erklärt.

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

Seit Beginn des Jahres 2015 wird die Norm DIN EN 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. Schwerpunkt lag dabei auf der Festlegung der Anforderungen an die metrologische Rückführung bei den Kalibrier- und Prüflaboratorien unter Berücksichtigung des gesetzlichen Auftrages der PTB im Rahmen des Einheiten- und Zeitgesetzes.

Bereits jetzt ist abzusehen, dass sich die Struktur der Norm deutlich verändern wird und dass wesentliche Inhalte der ebenfalls neu überarbeiteten DIN EN ISO 9001:2015 in die neue Norm einfließen werden. Die überarbeitete Norm wird künftig neue Anforderungen sowohl an Kalibrier- und Prüflaboratorien als auch im Rahmen der Meterkonvention an nationale Metrologieinstitute stellen.

Auf internationaler Ebene ist die PTB in der entsprechenden ISO/CASCO-Arbeitsgruppe über die Internationale Organisation für das gesetzliche Messwesen (OIML) vertreten.

Die in der Normungsarbeit gewonnenen PTB-Erfahrungen wurden u. a. in einen Workshop der osteuropäischen Metrologie-Organisation COOMET eingebracht. Ziel des Workshops war es, eine einheitliche Position der COOMET-Mitglieder zur Revision der o. g. Norm zu erarbeiten.

<sup>1</sup>[http://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/allgemeine\\_dokumente/qualitaetsmanagement/QM\\_Selbsterklaerung\\_2015.pdf](http://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/allgemeine_dokumente/qualitaetsmanagement/QM_Selbsterklaerung_2015.pdf)

<sup>2</sup><http://www.bipm.org/en/cipm-mra/>

<sup>3</sup><https://www.oiml.org/en/certificates/maa-certificates>

<sup>4</sup><http://iecex.iec.ch/>

at PTB. In addition, this year, the DFG/Leopoldina Recommendations on Scientific Freedom and Scientific Responsibility were discussed in interaction with PTB's ethics committee under the aspect of the “dual use problem” when handling security-relevant research (i.e., the danger that research findings might be misused for malicious purposes). Furthermore, within the quality management system, measures and structures were declared binding which are devised to minimize the risk of misuse of research results.

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

Since the beginning of 2015, standard DIN EN ISO/IEC 17 025, “General requirements for the competence of testing and calibration laboratories”, has been undergoing an in-depth revision. A coordinated position concerning this revision was developed within PTB and introduced at the national standardization level in the DIN working committee of “Certification Principles (Principles of Conformity Assessment)” and its “Laboratories” subcommittee. During this process, emphasis was placed on determining requirements for metrological traceability in calibration and testing laboratories, in consideration of the legal task of PTB within the scope of the Units and Time Act.

Even at this point, it is expected that the composition of the standard will change considerably, and that central elements of DIN EN ISO 9001:2015, which has also been revised, will find their way into the new standard. In future, the revised standard will impose new requirements on calibration and testing laboratories and – within the scope of the Metre Convention – on national metrology institutes as well.

On an international level, PTB is represented in the respective ISO/CASCO working group via the International Organization of Legal Metrology (OIML).

Experience gained by PTB in standardization work was incorporated into a workshop given by the Eastern European metrology organization COOMET, among other things. The objective of the workshop was for the COOMET members to develop a unified position on the revision of the above-mentioned standard.

### Gesetzliches Messwesen 2015

Am 1. Januar 2015 ist das neue Mess- und Eichrecht in Kraft getreten. Mit diesem Gesamtpaket ist das Mess- und Eichrecht grundlegend modernisiert worden, wobei das bestehende hohe Schutzniveau des deutschen Messwesens beibehalten wird. Mit der Neuordnung des gesetzlichen Messwesens gelten für europäisch und national geregelte Messgeräte die gleichen Anforderungen, wenn sie auf den Markt gebracht werden.

Die innerstaatliche Bauartzulassung und die Erreichung von national geregelten Messgeräten ist ab dem 1. Januar 2015 durch eine Konformitätsbewertung ersetzt worden. Das Inverkehrbringen aller gesetzlich geregelten Messgeräte wird im Rahmen der Marktüberwachung durch die zuständigen Landesbehörden überwacht. Die zuständigen Landesbehörden überwachen auch die ordnungsgemäße Verwendung von Messgeräten und Messwerten. Das neue Regelungssystem ist innovationsoffen und kann zukünftige technologische Entwicklungen zeitnah und angemessen erfassen. Die Eichung von verwendeten Messgeräten wird im bisherigen Umfang von den zuständigen Landesbehörden und bei den Verbrauchsmessgeräten auch von den staatlich anerkannten Prüfstellen durchgeführt.

Das gesetzliche Messwesen gewährleistet die Messrichtigkeit und Messbeständigkeit von Messungen im geschäftlichen Verkehr, von amtlichen Messungen und von Messungen im öffentlichen Interesse für über 120 Millionen verwendete Messgeräte. Dazu zählen Strom-, Wasser-, Gas- oder Wärmehemometer, Waagen, Tankzapfsäulen, Geschwindigkeitsmessgeräte, Strahlendosimeter, Taxameter oder Smart Meter, um nur einige der über 150 verschiedenen Messgerätearten zu nennen, deren Inverkehrbringen und Verwendung vom gesetzlichen Messwesen erfasst werden.

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.

2015 hat der Regelermittlungsausschuss für 90 % der gesetzlich geregelten Messgeräte Regeln unter Beteiligung aller interessierten Kreise ermittelt. Der

### Legal metrology 2015

On 1 January 2015, the new Measures and Verification Act came into force. This overall package helped to fundamentally modernize the measures and verification legislation; the existing high level of protection of German metrology, however, will be maintained. Now that legal metrology has been newly regulated in this way, identical requirements are valid for both European and nationally regulated measuring instruments when they are placed on the market.

As of 1 January 2015, the national type approval and the initial verification of nationally regulated measuring instruments have been replaced by a conformity assessment. The placing on the market of all legally regulated measuring instruments is monitored by the respective competent federal state authority within the scope of market surveillance. The competent federal state authorities also monitor the correct utilization of measuring instruments and measurement values. The new regulation system is open to innovations and can recognize future technological developments promptly and adequately. To the same extent as previously, the verification of measuring instruments which are in use is carried out by the competent federal state authorities and – in the case of consumption measuring devices – also by the state-approved test centers.

Legal metrology ensures the trueness and stability of measurements in commercial dealings, of official measurements, and of measurements which are of public interest, for more than 120 million measuring instruments in use. These include electricity meters, water meters, gas meters and heat meters, weighing instruments, fuel dispensers, speed meters, radiation measuring devices, taximeters and smart meters – to mention just some of the 150 different measuring instrument categories whose placing on the market and use are subject to legal metrology.

Rules and technical specifications for nationally regulated measuring instruments as well as rules and findings on conformity assessment procedures are determined by the Rule Determination Committee (Regelermittlungsausschuss) which was introduced within the scope of the Measures and Verification Act. In addition, this committee also identifies rules and findings to determine more specifically the duties of persons who use measuring instruments or measurement values.



Regelermittlungsausschuss ist unter [www.rea.ptb.de](http://www.rea.ptb.de) im Internet erreichbar.

Ein weiterer Ausschuss, der neben dem Regelermittlungsausschuss im Mess- und Eichgesetz geregelt ist, ist der Ausschuss der Konformitätsbewertungsstellen (AdKBS). Der AdKBS dient der Vereinheitlichung der Konformitätsbewertungspraxis der Konformitätsbewertungsstellen in Deutschland und ist unter der Leitung der PTB gebildet worden.

Aufgrund des neuen Mess- und Eichrechts und der neuen Ausschüsse ist die Satzung der PTB im Bezug auf die Vollversammlung für das Eichwesen geändert worden. Sie dient dem Informations- und Erfahrungsaustausch auf dem Gebiet des Mess- und Eichwesens. Unter diesen neuen Vorzeichen fand die Vollversammlung erstmals am 25. September 2015 statt.

Die Konformitätsbewertungsstelle der PTB führt Konformitätsbewertungen gemäß mehrerer europäischer Richtlinien durch. 2015 ist die Konformitätsbewertungsstelle bzgl. ihres Konformitätsbewertungsangebotes für die Richtlinien 2014/32/EU (Messgeräte) und 2014/31/EU (nichtselbsttätige Waagen) von der anerkennenden Stelle beim Bundesministerium für Wirtschaft und Energie erfolgreich notifiziert worden. Damit bietet die Konformitätsbewertungsstelle der PTB für alle gesetzlich geregelten Messgeräte Konformitätsbewertungen an.

In 2015, the Rule Determination Committee – with the participation of all interested parties – determined rules for 90 % of the legally regulated measuring instruments. The Rule Determination Committee can be found at [www.rea.ptb.de](http://www.rea.ptb.de) on the Internet.

Another committee which is regulated by the new Measures and Verification Act – besides the Rule Determination Committee – is the Committee of the Conformity Assessment Bodies (CABs) (Ausschuss der Konformitätsbewertungsstellen – AdKBS). This committee serves to harmonize the conformity assessment work of the CABs in Germany and was set up under the leadership of PTB.

Due to the new Measures and Verification Act and the new committees, the Charter of PTB has been modified with regard to the “General Assembly on Verification”. It serves to exchange information and experience in the field of metrology and verification. Since 25 September 2015, a “General Assembly on Metrology and Verification” has existed.

PTB’s Conformity Assessment Body carries out conformity assessments in accordance with several European guidelines. In 2015, the Conformity Assessment Body was successfully notified by the recognizing body at the Federal Ministry for Economic Affairs and Energy for its conformity assessment services for the Directives 2014/32/EU (Measuring Instruments) and 2014/31/EU (Non-automatic Weighing Instruments). PTB’s Conformity Assessment Body thus offers conformity assessments for all legally regulated measuring instruments.



### Validierung: Schlüssel für erfolgreiche Technologieverwertungsprozesse

Im Bereich der industriellen Forschung sind Kooperationsprojekte mit der Industrie, Drittmitelprojekte und Auslizenzierung von Know-how und Patenten die wesentlichen Bestandteile. Allein in diesem Jahr konnten 40 neue direkte Kooperationsprojekte mit der Industrie vereinbart werden. Patente und deren Verwertung stellen einen wichtigen Aspekt zur strukturierten Übergabe von Know-how aus der PTB in die Wirtschaft dar. Der Lizenzierungsgrad auf alle bisherigen Patentanmeldungen der PTB beträgt 31 %, bezogen auf die derzeit aktiven und damit kostenwirksamen Patentvorgänge liegt er sogar bei 47 %. Die hohe Lizenzierungsrate beruht im Wesentlichen darauf, dass diese Ideen in der Praxis häufig in Kooperation mit einem Unternehmen validiert werden – also zu einem Funktionsmuster aufgebaut werden. So können gezielt die Erkenntnisse aus der Forschung in neue Produkte und Dienstleistungen eingehen. Themenhefte zum Technologietransfer wie die PTB-Mitteilungen 2015/1 „Metrologie für Industrie und Mittelstand“, regelmäßige Messeauftritte und vor allem die Branchenkenntnisse der Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler sorgen für den Zugang zur Industrie.

Seit Jahren sorgt die PTB in vielen Kooperationsprojekten durch die Beteiligung an den Programmen „KMU-innovativ“, „Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand“ (ZIM) und dem „European Metrology Programme for Innovation and Research“ (EMPIR) für eine schnelle Umsetzung dieser Ideen. In diesem Jahr hat die PTB mit dem Programm „Transfer Metrologischer Technologien“ (TransMeT) ein eigenes Validierungsprogramm aufgelegt, deren Konditionen von interessierten Mittelständlern im Internet im Segment „Innovationen und Technologietransfer“ eingesehen werden können. Es leistet einen Beitrag zur Stärkung der Forschungsbasis und Wettbewerbsfähigkeit insbesondere von kleinen und mittleren Unternehmen (KMU), damit diese eine Umsetzung von PTB-Technologien schnell und flexibel erreichen können.

### Validation: A key element of successful technology transfer processes

Cooperation projects with industrial firms, projects funded by third parties and out-licensing of know-how and patents are the essential elements of industry-related research. In 2015 alone, 40 new direct cooperation projects with industrial firms were established. Creating and exploiting patents represents an important element in the structured transfer of know-how from PTB to the economy. Of all patents that have been filed to date, 31 % have been licensed; when considering applications which are currently active and thus incur costs, the licensing rate is even higher, at 47 %. The main reason for this

high licensing rate is that these ideas are frequently validated in the field – meaning they are developed into functional models – in cooperation with businesses. In this way, research findings can be purposefully applied to new products and services. Access to industry is made possible by special publications on technology transfer, such as PTB-Mitteilungen 2015/1, “Metrology for Industry and SMEs”, regular trade show appearances and, in particular, scientists’ knowledge of the industrial branches they cooperate with.

Over the course of many years, PTB has ensured in many cooperation projects that these ideas are implemented rapidly by participating in the following programs: “KMU-innovativ”; the Central Innovation Programme for SMEs (ZIM); and the European Metrology Programme for Innovation and Research (EMPIR). This year, PTB launched its own validation program, “Transfer of Metrological Technologies” (TransMeT), whose terms can be accessed by interested SMEs on the PTB website under “Innovation and Technology Transfer”. This program contributes to strengthening the research base and competitiveness of small and medium-sized enterprises (SMEs) in particular, in order to allow them to transfer PTB technologies rapidly and flexibly.



## Qualitätsinfrastruktur für erneuerbare Energien und Energieeffizienz in Lateinamerika und der Karibik

Die Wende hin zu erneuerbaren Energien und mehr Energieeffizienz steht auch in Lateinamerika und der Karibik oben auf der politischen Agenda. Bereits im Jahr 2014 wurden dort beeindruckende 54 % des Energiebedarfs aus regenerativen Quellen gedeckt, überwiegend durch Großwasserkraftwerke, die aber gesellschaftlich und umweltpolitisch umstritten sind. Daher bleibt das Potenzial für erneuerbare Energien groß, was sich in vielen staatlichen Initiativen widerspiegelt. Auch zur Verbesserung von Energieeffizienz werden Programme entwickelt. Der Wichtigkeit dieses Themas trägt auch die deutsche Entwicklungspolitik Rechnung: Die nachhaltige Gewinnung und Nutzung von Energie ist ein Kernpunkt im Konzept der Bundesregierung zur Zusammenarbeit mit Lateinamerika.

In diesem Zusammenhang steht das von der PTB im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (BMZ) durchgeführte Vorhaben „Qualitätsinfrastruktur für Energieeffizienz und erneuerbare Energien in Lateinamerika und der Karibik“. Es arbeitet unter dem Dach der Organisation Amerikanischer Staaten (Organisation of American States, OAS) und hat die Stärkung der regionalen Organisationen für Metrologie (Sistema Interamericano de Metrología, SIM), Normung (Comisión Panamericana de Normas Técnicas, COPANT) und Akkreditierung (Inter-American Accreditation Cooperation, IAAC) und ihrer nationalen Mitglieder zum Ziel. Ein sichtbarer Erfolg der kontinuierlichen Zusammenarbeit dieser Organisationen ist ihr Zusammenschluss im Amerikanischen Rat für Qualitätsinfrastruktur (Quality Infrastructure Council of the Americas, QICA), der 2014 formalisiert wurde. Außerdem ist es gelungen, die Internationale Agentur für Erneuerbare Energien (International Renewable Energy Agency (IRENA) und die Lateinamerikanische Energieorganisation (Organización Latinoamericana de Energía, OLADE) als strategische Partner für das Vorhaben zu gewinnen. Ihre Sektorkompetenz wird auf diese Weise für die Steuerung und inhaltliche Ausgestaltung der Kooperation nutzbar.

Zur wirkungsvollen Umsetzung von nationalen Entwicklungsplänen und Energiepolitiken ist unter anderem das zuverlässige Messen von Energiemengen unverzichtbar. Zu diesem Zweck wird die technische Kompetenz der Partnerinstitutionen durch regionalen Erfahrungsaustausch, Fortbildungsver-

## Quality infrastructure for renewable energy sources and energy efficiency in Latin America and the Caribbean

The transition to renewable energies and increased energy efficiency is also high on the political agenda in Latin America and the Caribbean. By 2014, an impressive 54 % of the demand for energy was already covered by regenerative sources – mainly by large-scale hydropower plants which are, however, socially and environmentally controversial. Therefore, the potential for renewable energies remains large, which is also reflected in a great number of government initiatives. In addition, programs to improve energy efficiency are being developed. The importance of this topic is also taken into account in German development policy: The sustainable production and use of energy is a core subject in the cooperation concept of the German Federal Government with regard to Latin America.

In this context, the project “Quality infrastructure for energy efficiency and renewable energies in Latin America and the Caribbean” is being implemented on behalf of the Federal Ministry for Economic Cooperation and Development (BMZ). It operates under the umbrella of the Organization of American States (OAS) and is aimed at strengthening the regional organizations for metrology (Sistema Interamericano de Metrología, SIM), standardization (Comisión Panamericana de Normas Técnicas, COPANT) and accreditation (Inter-American Accreditation Cooperation, IAAC) along with their national members. A visible success of the continuous cooperation of these organizations is their association in the Quality Infrastructure Council of the Americas (QICA) which was formalized in 2014. In addition, the project formed a strategic partnership with the International Renewable Energy Agency (IRENA) and the Latin American Energy Organization (Organización Latinoamericana de Energía, OLADE). The sector competence of these organizations contributes to steering the cooperation and defining its contents.

The reliable measurement of energy is, among other things, indispensable for the effective implementation of national development plans and energy policies. For this purpose, the technical competence of the partner institutions is consolidated by a regional exchange of experience as well as by capacity development courses and study trips. Thus, the services offered for the verification of energy meters have been improved in many national metrology institutes such as in Costa Rica, Panama, Peru and Pa-

anstaltungen und Studienreisen ausgebaut. In vielen nationalen Metrologieinstituten konnte damit das Angebot der Dienstleistungen verbessert werden, so z. B. in Costa Rica, Panama, Peru und Paraguay für die Eichung von Energiemesszählern. Die Partner in Bolivien, der Dominikanischen Republik und El Salvador können erstmals diese Dienstleistung anbieten. Uruguay und Kolumbien haben Kapazitäten zur Messung von elektrischer Spannung und Netzfrequenz aufgebaut.

Ebenfalls wurde im Rahmen des Vorhabens die erste interamerikanische Eignungsprüfung zur Energieeffizienzmessung bei Kühlschränken durchgeführt, an der elf Laboratorien aus sieben Ländern teilnahmen.

Auf Dialogforen werden politische Entscheidungsträger regelmäßig über die Bedeutung von Qualitätsinfrastruktur<sup>1)</sup> für die unterschiedlichen Themen informiert: Beispielsweise ist hier das Dialogforum zu Solarthermie zu nennen, das im Juli 2015 in Costa Rica mit Teilnehmern aus 14 Ländern der Region stattfand und gemeinsam mit OLADE und IRENA ausgerichtet wurde.

Bei der Durchführung dieser Aktivitäten nutzt das Vorhaben existierende Strukturen in den regionalen und nationalen Partnerorganisationen, die oft auch Früchte der langjährigen Zusammenarbeit der PTB in der Region sind. Partner aus Nationen wie Argentinien, Brasilien oder Mexiko steuern regelmäßig eigenes Know-how bei.

Ein Fachmann bei der Prüfung eines Solarthermie-Kollektors im Rahmen der Technischen Zusammenarbeit mit Mexiko.

An expert testing a collector of solar-thermal energy within the scope of the Technical Cooperation with Mexico.



Uruguay. The partners in Bolivia, in the Dominican Republic and in El Salvador now offer these services for the first time. Uruguay and Colombia have developed capacities for the measurement of electric voltage and line frequency.

Furthermore, the first inter-American proficiency test for the measurement of energy efficiency for refrigerators was performed within the scope of the project. Eleven laboratories from seven countries participated in this test.

In dialogue forums, political decision-makers are frequently informed about the importance of quality infrastructure<sup>1)</sup> for the different topics: An example is the dialogue forum on solar-thermal energy which took place in Costa Rica in July 2015 with participants from 14 countries of the region. This forum was organized in cooperation with OLADE and IRENA.

To implement these activities, the project makes use of existing structures in the regional and national partner organizations. These structures are often also the fruits of many years of cooperation with PTB in the region. Partners from nations such as Argentina, Brazil or Mexico regularly contribute know-how of their own.

Also at this level, PTB is involved in the field of energy. An example of this is the cooperation with the Mexican National Commission for the Efficient Use of Energy (Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía, CONUEE) which supports small and

Auch auf dieser Ebene engagiert sich die PTB im Energiebereich. So werden zum Beispiel zusammen mit der mexikanischen Nationalen Kommission für effiziente Energienutzung (Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía, CONUEE) kleine und mittlere Unternehmen bei der Einführung von Energiemanagementsystemen unterstützt. Des Weiteren unterstützt das Projekt fünf Prüflabore im Bereich Solarthermie auf ihrem Weg zur Akkreditierung. Zu diesem Zweck fand im September in Zusammenarbeit mit dem mexikanischen Metrologieinstitut (Centro Nacional de Metrología, CENAM) eine Vergleichsmessung für Pyranometer statt. Diese Geräte zur Messung der eintreffenden globalen Sonneneinstrahlung sind unter anderem notwendig, um die Effizienz von Solarkollektoren zu bestimmen.

Der nachhaltige Aufbau derartiger Kapazitäten vor Ort ist ein wichtiges Ziel der Technischen Zusammenarbeit. Die dadurch erreichten positiven Entwicklungen in Energieeffizienz und erneuerbaren Energien tragen unter anderem auch zu einer Minderung des Klimawandels bei. Dies wiederum kommt Menschen in aller Welt zugute.

medium-sized enterprises in the implementation of energy management systems. In addition, the project assists five test laboratories in the field of solar thermal energy on their way towards accreditation. For this purpose, a comparison measurement for pyranometers was performed in September in cooperation with the Mexican metrology institute (Centro Nacional de Metrología, CENAM). These devices for the measurement of incident global solar radiation are, among other things, required to determine the efficiency of solar collectors.

The sustainable establishment of such capacities on site is an important goal of the Technical Cooperation. The positive developments achieved in this way in the fields of energy efficiency and renewable energies contribute, among other things, to mitigating climate change. This will, in turn, benefit people all over the world.

1) Eine international anerkannte Qualitätsinfrastruktur dient sicherheits-, umwelt-, gesundheits- und verbraucherpolitischen Zielen und trägt in Entwicklungs- und Schwellenländern zu einer nachhaltigen wirtschaftlichen, ökologischen und sozialen Entwicklung bei. Die effektive Nutzung erneuerbarer Energien und die Steigerung von Energieeffizienz sind ohne eine entsprechende Qualitätsinfrastruktur nicht denkbar. In vielen Entwicklungs- und Schwellenländern fehlen ausreichende und international anerkannte Mess-, Prüf-, Normungs-, Akkreditierungs- und Zertifizierungskapazitäten. Erst durch diese Institutionen werden Gesetze, Verordnungen und technische Regelwerke umsetzbar.

1) An internationally recognized quality infrastructure serves objectives in terms of safety, environment, health and consumer protection and, in developing countries and emerging economies, contributes to sustainable economic, ecological and social development. Effective use of renewable energies and an increase in energy efficiency are impossible without a corresponding quality infrastructure. Adequate and internationally recognized measurement, testing, standardization, accreditation and certification capacities are absent in many developing countries and emerging economies. Only by these institutions can laws, ordinances and technical regulations be implemented.



## Gelungene PTB-Premiere: IdeenExpo 2015



Neun Tage lang im Juli 2015 hieß das Motto für viele Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter: „Wir sind auf der IdeenExpo!“ Die PTB nahm erstmals teil an diesem großen Jahrmarkt der Naturwissenschaften und der Technik, der vor allem Schülerinnen und Schüler anspricht. Die Bilanz fällt sowohl für die gesamte



Veranstaltung (mit einem Rekord von über 350 000 Besuchern) als auch speziell für den PTB-Stand sehr positiv aus. Dieses positive Fazit schließt alle Stimmen der Organisatoren und Standbetreuer ein, aber auch externe Gäste wie Gabriele Heinen-Kljajić (niedersächsische Ministerin für Wissenschaft und Kultur), Dr. Ole Janssen (Unterabteilungsleiter im BMWi) oder auch die verantwortlichen Organisatoren der IdeenExpo selbst. Und die Schülerinnen und Schüler, also die eigentlichen Zielgruppen, werden ihren – auch intellektuellen – Spaß auf dem PTB-Stand gehabt haben. Denn das PTB-Programm war mit einer Vorstellung der PTB-Ausbildung und einer Reise durch die Welt der sieben Basiseinheiten umfangreich und anspruchsvoll zugleich. Nach dieser gelungenen Premiere lautet das Motto: Wir sind auch zukünftig dabei.

Impressionen vom PTB-Stand auf der IdeenExpo 2015  
Impressions of PTB's stand at the 2015 IdeenExpo

## A successful premiere for PTB: The 2015 IdeenExpo

For nine days in July 2015, many of PTB's staff lived according to the motto: "We are at the IdeenExpo!" For the first time, PTB took part in this large annual fair focusing on sciences and technology which mainly addresses students. The event was a roaring success, both for the fair itself (with a record of more than 350,000 visitors) and, especially, for the PTB stand. And this positive result was shared not only by the organizers and the staff at the stand, but also by external guests such as Ms. Heinen-Kljajić (Lower Saxony's Minister of Science and Culture), Dr. Ole



Janssen (Head of Directorate at the Federal Ministry of Economic Affairs and Energy – BMWi) as well as by the organizers in charge of the IdeenExpo themselves. And the students, i.e. the actual target group, will most certainly also have had fun – even if it was



intellectually demanding – at PTB's stand. With a presentation of the diverse possibilities of training at PTB and a "guided tour" of the seven base units, PTB's stand was both wide-ranging and challenging. After such a successful premiere for PTB, the motto has now become: "We will be at the IdeenExpo again!"



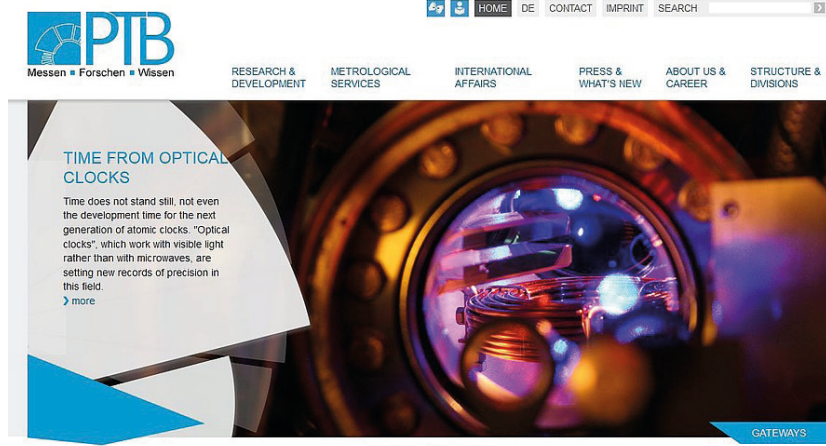
## Neuer Webauftritt der PTB

Manchmal kommen die Dinge in die Jahre. Und dann brauchen sie eine Auffrischung. Unter diesem Anspruch hat sich die PTB einen neuen Internetauftritt gebaut – mit neuem Design, neuer Struktur und vielen neuen Inhalten. Auf Aktualität und Nutzerfreundlichkeit wurde besonderes Augenmerk gelegt. Am 18. Mai 2015 wurde der alte Auftritt „vom Netz genommen“ und durch den neuen ersetzt – erreichbar unter der alten Adresse (www.ptb.de).

Für den Nutzer soll sich auf der Webseite das Motto „Viele Wege führen ans Ziel“ erfüllen. Denn auch für den Insider ist es nicht immer leicht, sich in der Struktur der PTB zurechtzufinden – zu umfangreich und zu vielfältig sind die Aufgaben und Arbeitsgebiete einer PTB, die einerseits nationales Metrologieinstitut und andererseits Anbieter metrologischer Dienstleistungen nach dem Mess- und Eichrecht ist. Daher bietet der Webauftritt mehrere Zugänge bzw. Nutzerperspektiven: Ein thematischer Zugang bietet sich beispielsweise über „Forschung & Entwicklung“ oder „Metrologische Dienstleistungen“ an, während der Direkteinstieg verschiedenen Kundengruppen Orientierung bietet. Wer sich in der PTB-Organisation gut auskennt, findet durch den strukturellen Zugang über „Struktur & Abteilungen“, was er sucht. Und hat der Nutzer einen Inhalt nicht nur gesucht, sondern auch gefunden, so verrät ihm die rechte Spalte auf jeder Webseite, wer zu diesem Inhalt der richtige Ansprechpartner ist.

Insgesamt ist der neue Auftritt ein Gemeinschaftswerk vieler Köpfe und Hände. Innerhalb der PTB waren und sind federführend die Gruppen „Administrative IT-Anwendungen“ und die „Presse- und Öffentlichkeitsarbeit“ für den Web-Relaunch verantwortlich. Gestaltungsfragen hingegen wurden von der Agentur Rubinmedia aus Köln beantwortet, die nach einer Vorauswahl aus fünfzig und schließlich in einem Pitch von fünf Agenturen den Zuschlag als wirtschaftlichster Anbieter erhalten hatte.

Screenshot vom Kopf der neuen Homepage www.ptb.de



agencies was finally narrowed down to a shortlist of five.

Screenshot of the top of the new homepage www.ptb.de

## PTB's New Website

Sometimes things start to age. And then they need to be revived. This is why PTB has developed a new Internet site – with a new design, a new structure and lots of new material. Particular attention has been paid to being up-to-date and user-friendliness. On 18 May 2015 the old website was „taken off the web“ and replaced by the new one – which is available at the old address (Opens internal link in current windowwww.ptb.de).

Anyone using the website should see that „many paths lead to the same goal“. Because even for insiders, it is not always easy to find the right way through PTB's structure – PTB's tasks and fields of work are too extensive and too diverse – on the one hand it is a National Metrology Institute and on the other hand it provides metrological services according to the Measures and Verification Act. The website therefore offers several ways of accessing or of looking at our institute: „Research & Development“ or „Metrological Services“ take you to specific subject areas, while the „Gateways“ offer guidance for different client groups. People who know their way around the structure of PTB, will find what they are looking for under „Structure & Divisions“. And if someone using the website has not only been looking for something specific but has also found it, then the right-hand column of every web page says who the contact person is for that particular field.

All in all, the new website is the result of a joint effort by many heads and hands. Within PTB the „Administrative IT Applications“ and the „Press and Information Office“ teams were and still are responsible for relaunching the website. Design issues however were dealt with by the Rubinmedia agency based in Cologne, which was awarded with the task as the most economic provider after a longlist of fifty



# Akademische Abschlüsse • Academic Degrees

## Promotionen 2015 • Doctorates in 2015

Name	Organisationseinheit	Thema
Lucas Fricke	2.5	Einzel-Elektronen-Ladungsdetektion an nicht-adiabatischen Elektronenpumpen
Niklas Liebing	2.5	Thermoelektrische Effekte in magnetischen Tunnelbarrieren – Der Tunnel-magneto-Seebeck Effekt
André Müller	2.5	Nanostrukturierte Graphendevices
Daniela Rauch	3.4	Quantum criticality in magnetically unstable 4f- and 3d-electron metals
Asghar Ghorbani	3.5	A stand alone PDF method for unsteady reacting turbulent flows : Ignition by hot jets
Rico Tschirschwitz (BAM)	3.7	Entwicklung von Bestimmungsverfahren der sicherheitstechnischen Kenngrößen von Gasen und Dämpfen für nicht-atmosphärische Bedingungen
Sebastian Häfner	4.3	Ultra-stabile Lasersysteme für Weltraum und Bodenwendungen
Stefan Vogt	4.3	Eine transportable optische Gitteruhr basierend auf Strontium
Florian Gebert	QUEST-1	Precision measurement of the isotopic shift in calcium ions using photon recoil spectroscopy
Jonas Keller	QUEST-2	Spectroscopic characterization of ion motion for an optical clock based on Coulomb crystals
Jutta Mildner	5.4	Optimierung der laserinduzierten Plasmaspektroskopie an Metallen durch Femtosekunden-Doppelpulse für die Entwicklung eines hochauflösenden 3D-Rasterabbildungsverfahrens
Jan Wernecke	7.1	When size does matter: Dimensional metrology of nanostructured layers and surfaces using X-rays
Rainer Unterumsberger	7.2	Effiziente hochauflösende Röntgenemissionspektrometrie mit Synchrotronstrahlung
Ioana Slabu	8.2	Synthesis, characterization and application of superparamagnetic particles in medical diagnostics and therapy
Frank Wiekhorst	8.2	Behaviour of anisotropy and magnetic moment in disordered iron-platinum nanoparticles determined by static and dynamic magnetization measurements
Stefan Fruhner	8.4	Realistic Models of the Electrical Excitation in the Human Heart and the Determination of the Cardiac Magnetic Field

**Diplom- und Masterarbeiten 2015 • (Master) Theses in 2015**

Name	Organisationseinheit	Thema
Martin Tüllmann	1.7	Schalleistungsemission von Monopolen im Raum
Jan Rohde	2.2	Entwicklung von Hochfrequenzempfängern zur vektoriellen Messung der elektrischen Feldstärke zum Einsatz von unbemannten Luftfahrzeugen
Matthias Schmidt	2.3	Entwicklung und Aufbau einer softwaregestützten Normalmesseinrichtung für elektrische Wechselleistung für Frequenzen bis 150 kHz
Alexander Fernandez Scarioni	2.5	Termopotencia Magnetica de una Pared de Dominios; Domain wall magneto-Seebeck effect
Lars Freise	2.5	Untersuchung von Einzelladungspumpen mit verbesserter Kontrolle der elektrischen Potentiale
Katharina Olzem	3.2	Optimierung eines Messaufbaus für die Anforderungen eines Normals für ein Rußaerosol hinsichtlich Trübungskoeffizienten und Massendichte im oberen Konzentrationsbereich
Bin Shen	3.5	Analytische Untersuchungen und Berechnungen der Eisenverluste und den Temperaturen eines Permanentmagnet-Synchronmotors
Aimen Hmida	3.5	Entwicklung eines LabVIEW-Programms zur Steuerung einer SPS mittels OPC-Server
Andreas Walth	3.5	Entwicklung eines Konzepts und der dazugehörigen Software zur automatisierten Prüfung von Motorschutzgeräten
Nathalie Leise	4.1	Temperaturabhängigkeit der elektrischen und optischen Eigenschaften großflächiger OLEDs
Tobias Sauer	6.2	Berechnung der Organdosis von Patienten für unterschiedliche Quellenmodelle eines medizinischen Computertomographen
Dennis Mauch	6.4	Die doppelt-differentielle Neutronenausbeute der Kernreaktion ${}^9\text{Be}+d$ bei einer Deuteronenergie von 3 MeV
Manuel Bittner	6.6	Simulation der ortsabhängigen Vollabsorptionseffizienz eines HPGe-Detektors mit Hilfe von EGSnrc sowie deren Auswirkung auf Korrekturrechnungen für ein Kohlenstoffionenexperiment
Marco Schmidt	7.2	SQUID-basiertes Rauschthermometer für sub-Millikelvin-Temperaturen
David Gilbers	7.3	Radiometrische Charakterisierung eines Array-Spektrometers zur Messung des spektralen Emissionsgrades oberhalb von 1000 °C
Max Reiniger	7.3	Design eines Hochtemperatur-Probenhalters für Emissionsgradmessung unter Vakuum
Markus Wehpke	7.4	Entwicklung eines Kalibriersystems für die Darstellung der Internationalen Temperaturskala



**Diplom- und Masterarbeiten 2015 • (Master) Theses in 2015**

Name	Organisationseinheit	Thema
René Freyer	8.3	Entwicklung eines optischen Bildgebungsverfahrens für die medizinische Diagnostik
Susanne Dehnad	8.3	Optimierung eines Nachweisverfahrens für die qualitative- und quantitative Bestimmung der DNA von <i>M. tuberculosis</i>
Katja Fuchs	8.3	Optimierung und Charakterisierung eines Scanning-Systems zur zeitaufgelösten funktionellen Nahinfrarotspektroskopie
Ramona Rothfischer	8.3	Vergleich verschiedener Methoden zur Bestimmung der optischen Eigenschaften von Gewebephantomen
Lauren Willgeroth	8.4	Pattern Formation in Coupled Multi-Scale Systems
Pavel Buran	8.4	Control of wave dynamics in a model of heterogeneous cardiac tissue

**Bachelorarbeiten 2015 • Bachelor Theses in 2015**

Name	Organisationseinheit	Thema
Hauke Powileit	1.6	Entwicklung eines AEP-Audiometers zur Untersuchung von Gehirnantworten bei Tieffrequenz- und Infraschall-Stimulation
Henning Küwen	1.7	Entwicklung eines eindimensionalen Modellaufbaus im Maßstab 1:10 zur Messung des Schalldämm-Maßes bei extrem niedrigen Frequenzen
Samuel Gibson	1.7	Entwicklung eines Messplatzes zur Prüfung von Norm- Trittschall-Hammerwerken mit Empfangsplatten
Hendrik Badura	2.3	Entwicklung einer Spannungswandlermesseinrichtung ESM III
Merveille Tchontie	3.3	Experimentelle Untersuchung des Einflusses von CO <sub>2</sub> -Gehalt auf den Brennwert und Dichte von Methan/CO <sub>2</sub> Gemischen als Grundlage für die Bewertung der Beschaffenheit von biogashaltigen H- Gasen
Jürgen Bewersdorff	3.5	Untersuchung zur statischen und dynamischen Beanspruchung von Gehäusen der Zündschutzart „Druckfeste Kapselung“ mittels Dehnungsmessstreifen
Markus Flegel	3.5	Erweiterung des Programms Druckmess in C++, Erstellen und Programmieren eines Grundkonzeptes für die Konvertierung des Programms in Labview
André Zobel	3.7	Untersuchung zum Einfluss des Anfangsdrucks auf das Anlaufverhalten von Detonationen in Rohrleitungen
Johannes Kaden	3.7	Untersuchungen der Zündwirksamkeit von repetierenden Reibkontakten in Wasserstoff-Luft-Gemischen
Florian Baumann	3.7	Untersuchung zur Zündfähigkeit einer Sprühwolke elektrischer Spritzpistolen
Andreas Straub	4.2	Topografiemessung mit einem scannenden Abstandssensor und Entwicklung verschiedener Messstrategien
Christof Hellmann	4.4	Auslegung und Test einer Intensitätsregelung für die Positionierlaser an der Atomuhr CSF2
Henrik Wingerath	QUEST-2	Erzeugung von 230 nm Laserstrahlung zur Detektion von Indium Ionen
Nils Bönsch	5.5	Untersuchung des thermischen Verhaltens einer Ultrapräzisionsdrehmaschine am Beispiel der Moore 250 UPL
Friederike Grote	6.2	Analyse und Reduktion des Kanalübersprechens bei Analog-Digital-Wandlern
Patrik Kramer	6.3	Aufbau und Implementierung eines Messdatenerfassungssystems zur Aufnahme von Röntgenpulsen in Echtzeit

## Bachelorarbeiten 2015 • Bachelor Theses in 2015

Name	Organisationseinheit	Thema
Max-Uwe Noll	7.5	Automatisierte Positionsbestimmung des Messvolumens für die Laser-Doppler-Velozimetrie
Ümet Sen	7.5	Konstruktion und Aufbau einer Vielfachreflexionszelle nach Herriott mit transversaler Einkopplung
Eva Al-Dabbagh	8.2	Untersuchungen zur Reduktion des Restmagnetfelds anhand von Korrekturspulen in einer extrem geschirmten Kabine
Firas El-Nahas	8.2	Aufbau, Charakterisierung, Kalibrierung und Anwendung eines Dreikanal-SQUID-Messsystems
Paul Zwinscher	8.2	Charakterisierung eines optischen Messverfahrens zur Bestimmung des magnetischen Moments von Nanopartikeln
Carl Totz	8.4	Charakterisierung der Bewegung einzelner Teilchen in aktiver Materie

# Zahlen und Fakten • Figures and Facts

## Personal: Entwicklung • Staff: development

Personelle Entwicklung von 2006 bis 2015 (Stand: 31. Dezember 2015) • Development of staff  
 a) unbefristet • unlimited in time b) zeitlich befristet • limited in time

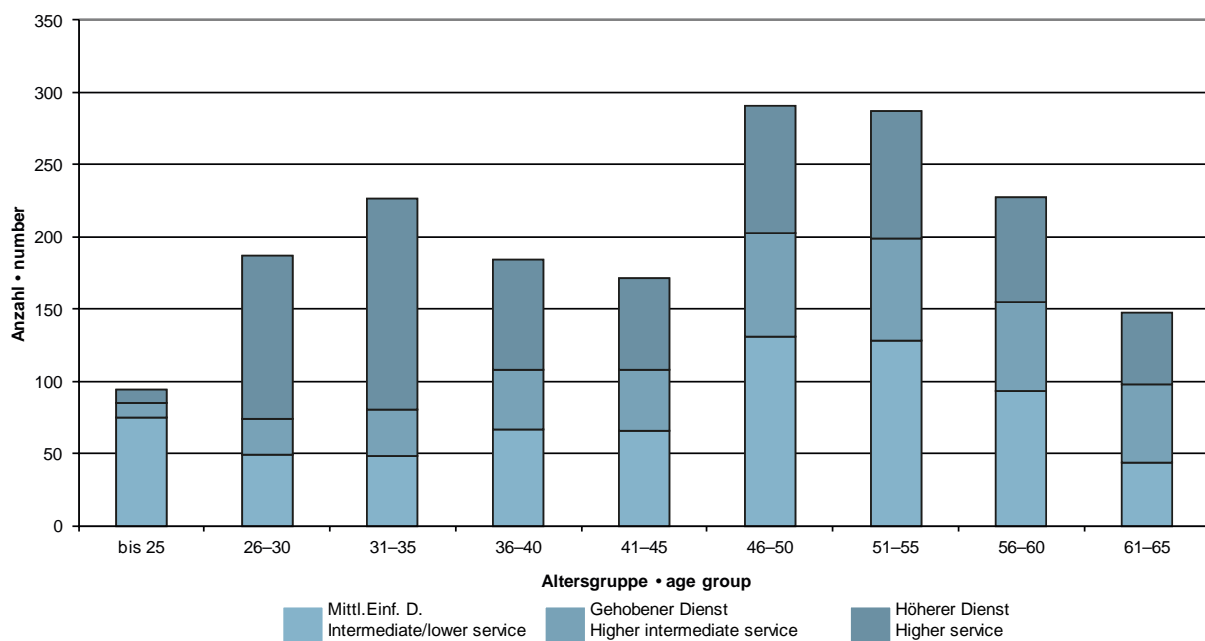
Beschäftigungsverhältnis	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
a)										
Beamte • civil servants	515	523	517	513	537	535	550	540	533	522
Angestellte • employees	863	833	830	831	795	779	752	718	704	725
Arbeiter • workers	196	--*	--	--	--	--	--	--	--	--
gesamt • total	1378	1356	1347	1344	1332	1314	1302	1258	1237	1247

b)

Auszubildende • trainees	150	136	134	135	134	131	135	140	142	141
befristet Beschäftigte • temporary staff	66	98	110	175	230	264	209	234	211	248
Drittmittelpersonal • staff members financed by third parties	169	162	172	185	194	216	286	303	295	319
Mitarbeiter gesamt • staff members in total	1763	1752	1763	1839	1890	1925	1932	1935	1885	1955

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

## Personal: Altersstruktur • Staff: age structure



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

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



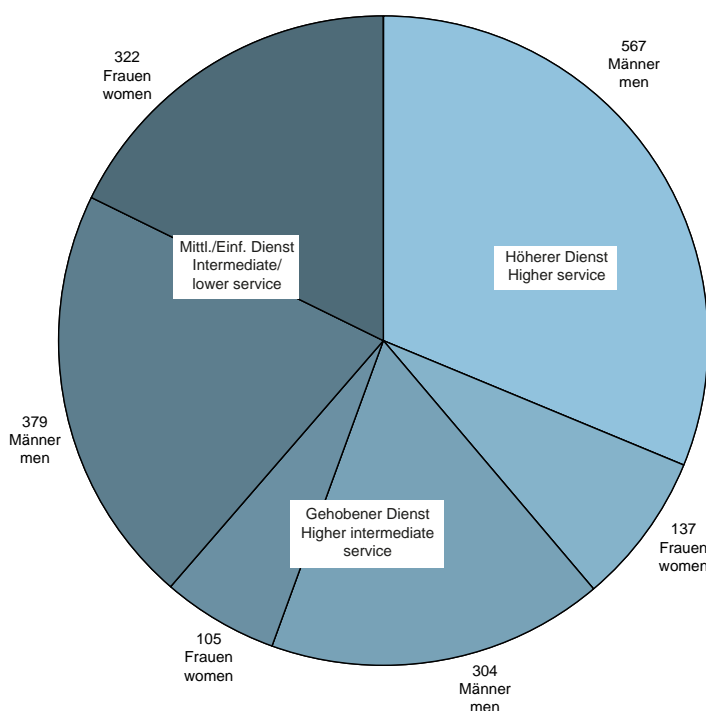
**Ausbildung • Training (31. Dezember 2015)**

	BS	Berlin	
Duales Studium Elektrotechnik im Praxisverbund	15 (3)	--	Dual studies in electrical engineering in a practice union
IT-Systemelektroniker	14 (3)	--	information and telecommunication technologists
Fachinformatiker	3 (3)	--	qualified IT specialist
Elektroniker/in für Geräte und Systeme	30 (7)	--	electronics technicians for devices and systems
Physiklaboranten	19 (5)	--	laboratory technicians, physics
Elektroniker für Energie- und Gebäudetechnik	13 (3)	--	electronics engineers for electrical and building services engineering
Feinwerkmechaniker Fachrichtung Feinmechanik	15 (4)	4 (0)	precision instrument makers speciality: precision mechanics
Fotografen	4 (2)	--	photographers
Mediengestalter	3 (1)	--	media designers
Tischler	--	4 (0)	joiners
Elektroniker/in für Informations- und Systemtechnik	--	8 (2)	electronics technicians for information and systems technology
Verwaltungsfachangestellte	--	7 (0)	public administration employees
Kaufmann/frau für Bürokommunikation	--	2 (2)	office management assistant
gesamt	116 (31)	25 (4)	total

Die PTB gehört zu den größten Ausbildungsbetrieben in der Region Braunschweig. Gegenwärtig sind 141 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. 141 trainees are at present employed by PTB. The figures in parentheses indicate fresh engagements in the year under review.

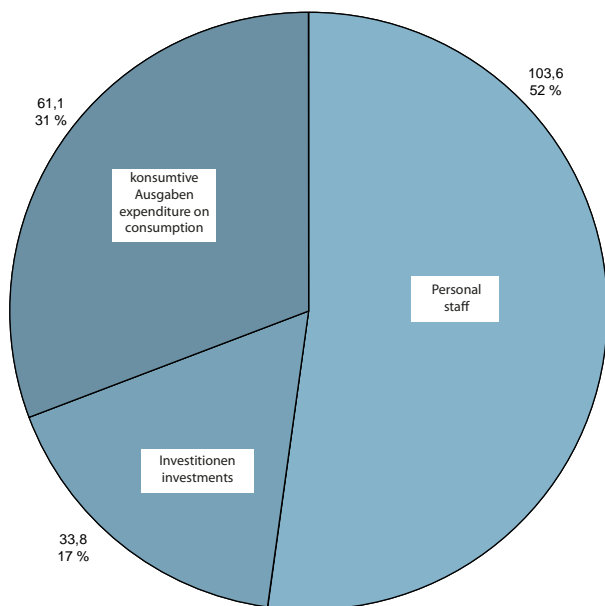
**Personal: Laufbahn Staff • civil service career**



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



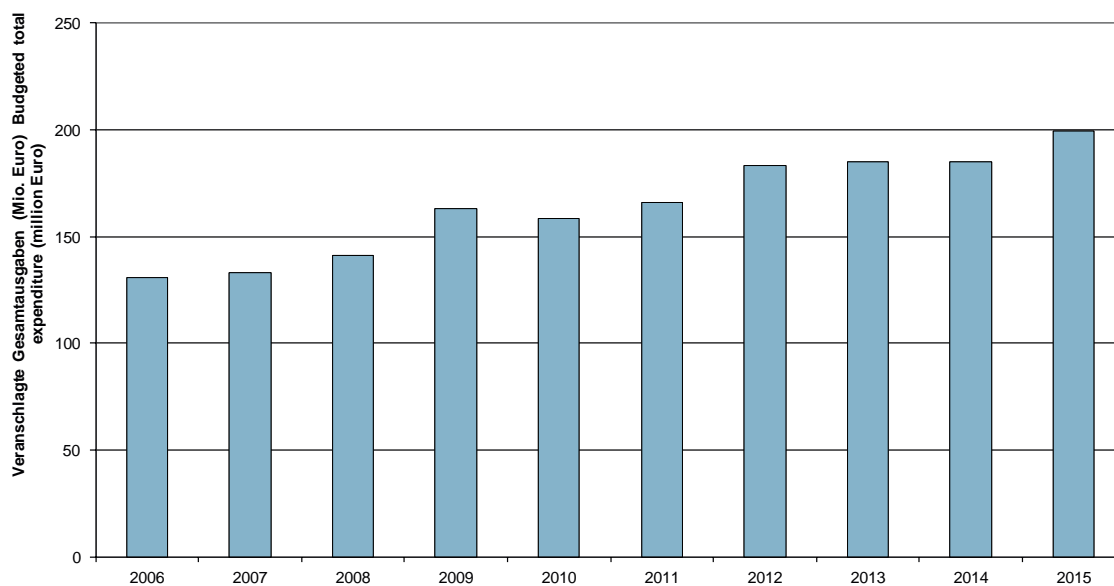
Die Grafik zeigt, wie sich im Berichtsjahr die veranschlagten Ausgaben verteilen (in Mio. Euro). Zum Vergleich nennt die Tabelle die Vergleichszahlen der letzten Jahre.

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	2013	2014	2015	budgetary means
Personalausgaben	97,3	101,0	103,6	staff costs
Investitionen (Bau und Geräte)	29,5	27,6	33,8	investments (building activities and instruments)
Zuweisungen und Zuschüsse	1,2	1,1	1,2	allocations and grants
konsumtive Ausgaben	57,1	55,8	61,1	expenditure on consumption
gesamt	185,1	185,5	199,7	total

Haushalt: Entwicklung • Budget: development

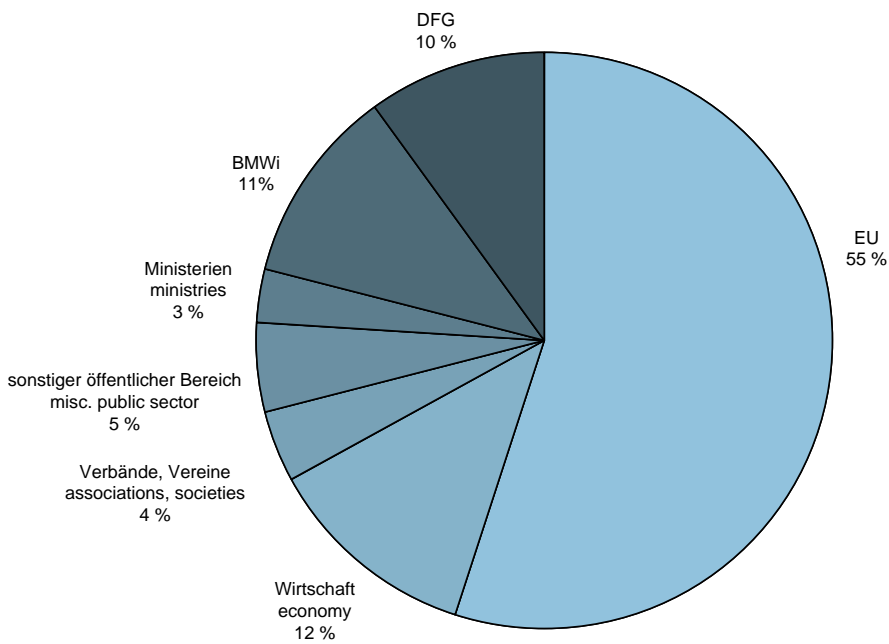


Entwicklung der Gesamtausgaben im PTB-Haushalt in den letzten zehn Jahren  
Development of the total expenditure of the PTB budget in the past ten years

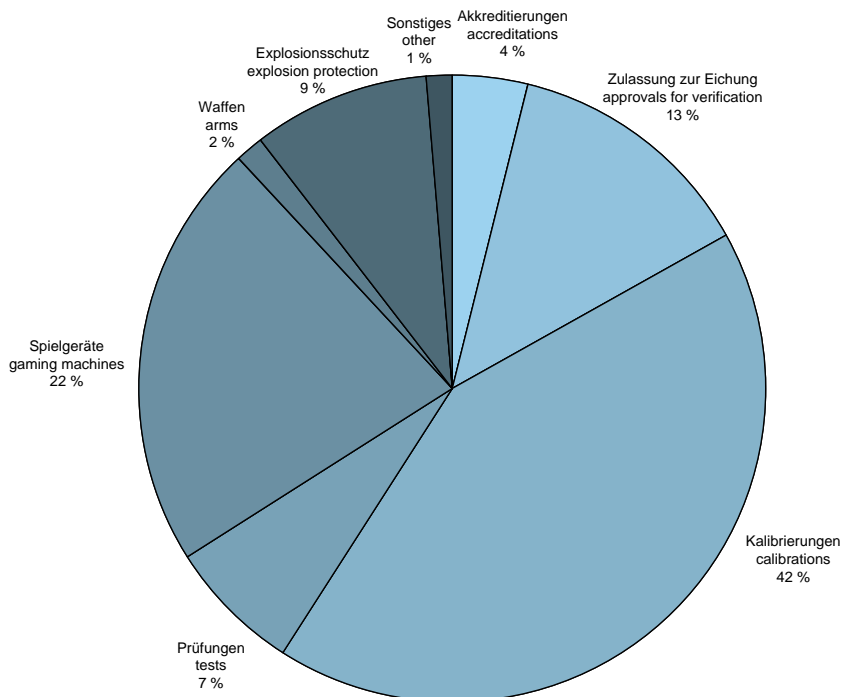
**Drittmittel: Forschungsprojekte • Third-party funds: research projects**

Die Drittmittel für Forschungsvorhaben summieren sich 2015 auf 17,9 Mio. Euro. Die Grafik gibt die prozentualen Anteile der unterschiedlichen Quellen an. Insgesamt wurden im Berichtsjahr 33,7 Mio. Euro für 684 Drittmittelprojekte (Forschungsvorhaben und Projekte der Technischen Zusammenarbeit) verwendet (davon 3,3 Mio. Euro für 107 Projekte in Berlin).

In 2015, the third-party funds for research projects added up to a total of 17.9 million euros. The chart shows the contributions (in percent) from the different sources. In the year under review, a total of 33.7 million euros were used for 684 third-party projects (research projects and technical cooperation projects), 3.3 million euros of these for 107 projects in Berlin.



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



Einnahmenanteile der verschiedenen Dienstleistungsbereiche der PTB im Jahr 2015.  
Gesamtforderungen: 11,18 Millionen Euro

Income distribution of 2015 among the various service sectors of PTB.  
Total receivables: 11.18 million euros

### Umwelt: Verbrauchszahlen • Environment: consumption figures

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

<b>... in Braunschweig</b>		2013	2014	2015	
Ressourcen:					resources:
elektrische Energie	MWh	27 800	27 600	27 600	electrical energy
Wärme	MWh	24 400	21 100	21 600	heat
Gas	m <sup>3</sup>	28 500	26 900	27 100	gas
Wasser	m <sup>3</sup>	91 100	85 600	79 700	water
Abfälle:					waste produced:
hausmüllähnlich	t	87	75	90	refuse-like
recycelt	t	194	209	203	recycled
zur Beseitigung	t	15	20	56	hazardous
Entsorgungskosten (ca.)	EUR	78 500	83 900	110 300	waste disposal costs (approx.)

<b>... in Berlin</b>		2013	2014	2015	
Ressourcen:					resources:
elektrische Energie	MWh	8000	8500	8540	electrical energy
Gas	m <sup>3</sup>	11 000	19 700	11 280	gas
Wasser	m <sup>3</sup>	32 400	32 800	52 500	water
Helium, flüssig	l	48 000	49 300	47 900	helium, liquid
Stickstoff, flüssig	l	44 000	51 900	52 280	nitrogen, liquid
Abfälle:					waste produced:
hausmüllähnlich	t	43	47	47	refuse-like
recycelt	t	63	63	53	recycled
zur Beseitigung	t	3	7	9	hazardous
Entsorgungskosten (ca.)	EUR	15 800	10 950	8 200	waste disposal costs (approx.)



**PTB-Seminare im Jahr 2015 • PTB seminars in 2015**

HVDC – Erzeugung, Messung und Anwendung  
Leitung: Dr. J. Meisner, Dr. S. Bauer (2.3/2.6)  
Februar 2015

VUV and EUV Metrology  
Leitung: Dr. F. Scholze (7.1)  
November 2015

Aktuelle Fortschritte von Kalibrierverfahren im  
Nieder- und Hochfrequenzbereich 2015  
Leitung: Dr. J. Melcher, Dr. T. Schrader (2.1/2.2)  
April 2015

Messunsicherheiten bei der Darstellung und  
Messung des Drehmomentes  
Leitung: Dr. C. Schlegel (1.2)  
November 2015

Novel approaches to uncertainty evaluation  
Leitung: Dr. M. Bär (8.4)  
April 2015

**Veröffentlichungen und Vorträge • Publications and Lectures**

Anzahl der Veröffentlichungen der PTB-Mitarbeiter/innen (in wissenschaftlichen Journalen, Büchern, Tagungsbänden etc.) in den Jahren 2012 bis 2015 (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 2012 and 2015 (cf. database “PTB-Publica” on the web) and number of lectures held by PTB staff members outside PTB in these years.

	2012*	2013*	2014*	2015
Veröffentlichungen	713	733	767	665
Vorträge	940	1087	1225	955

\* Die Daten aus den vergangenen Jahren (vgl. die entsprechenden Jahresberichte) wurden aktualisiert, da die Angaben lediglich den Stand der Datenbank zum Redaktionsschluss des Jahresberichts (14. März 2016) 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 (March 14, 2016). Subsequent entries in the database lead to distinctly higher numbers.

**Gastwissenschaftler, Gäste und Besucher**

Im letzten Jahr kamen rund 9200 Besucher aus aller Welt in die PTB (Standort Braunschweig). Den größten Anteil bildeten die metrologischen Fachbesucher aus Wissenschaft und Wirtschaft (5005) sowie die Teilnehmer an unterschiedlichsten Seminaren, Tagungen und Kolloquien (2694). Auch der allgemeine Besucherdienst der PTB im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit fand wie gewohnt regen Zuspruch (86 Besuchergruppen). Hinzu kamen zahlreiche Grundschulklassen, die im WissensForscher-Labor der PTB physikalische Experimente selbst durchführten. Insgesamt fanden so rund 1495 „Besucher in Gruppen“ den Weg in die PTB.

**Guest scientists, guests and visitors**

Last year, approx. 9200 people from all over the world visited PTB (Braunschweig site). They were largely metrology specialists from science and the economy (5005) as well as participants in various seminars, conferences and colloquia (2694). Visits to PTB by the general public within the scope of public relations work were also very popular as usual (86 groups of visitors). Furthermore, numerous primary school classes came and conducted their own physics experiments in the PTB “WissensForscher” (KnowledgeSearchers) laboratory. Thus, altogether, approx. 1495 “visitors in groups” found their way to PTB.

Projektpartner der PTB

PTB's project partners



**Internationale Zusammenarbeit**

Die Qualitätsinfrastruktur-Projekte des Fachbereichs *Technische Zusammenarbeit* verbessern die Situation von Entwicklungs- und Schwellenländern. Die mit Flaggen und Logos markierten 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, die Europäische Union und die Weltbank finanzieren die Projekte.

**Volumen 2014**

Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung 14,3 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.

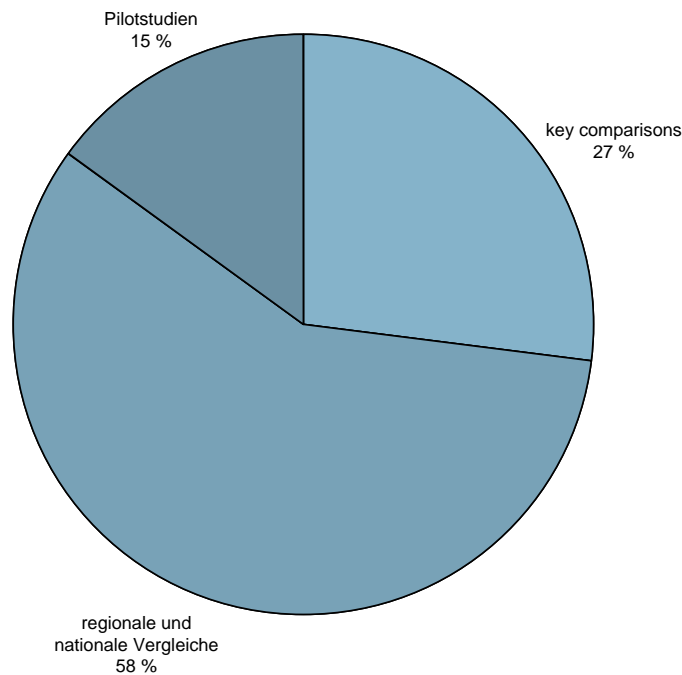
The projects are funded by the Federal Ministry for Economic Cooperation and Development (BMZ), the European Union and the World Bank.

**Funding volume 2014**

Federal Ministry for Economic Cooperation and Development 14.3 million €

### Internationale Vergleichsmessungen • International comparison measurements

Die PTB nahm im Berichtsjahr an 32 Vergleichsmessungen teil, und zwar an 9 Schlüsselvergleichen, 19 regionalen/nationalen Vergleichen und 4 Pilotstudien. 59 % der Vergleichsmessungen waren von direkter Relevanz für die Kalibrier- und Messmöglichkeiten der PTB im Rahmen des CIPM-MRA. An 10 Vergleichsmessungen nahm die PTB als Pilotlabor teil.



In the year under report, PTB took part in 32 comparable measurements, namely 9 key comparisons, 19 regional/national comparisons and 4 pilot studies. 59 % 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 10 comparable measurements as a pilot lab.

### Nationale Normungsvorhaben • National standardization projects

Die PTB engagierte sich im Jahr 2015 in 577 nationalen Gremien, darunter in 208 Normungsgremien. Insgesamt hat sie dabei 84-mal die Leitung inne.

PTB participates in 577 national bodies, among these 208 in the field of standardization. PTB heads a total of 84 of these bodies.

### Internationale Normungsvorhaben • International standardization projects

Die PTB engagierte sich im Jahr 2015 in 583 internationalen Gremien, darunter in 227 Normungsgremien. Insgesamt hat sie dabei 89-mal die Leitung inne.

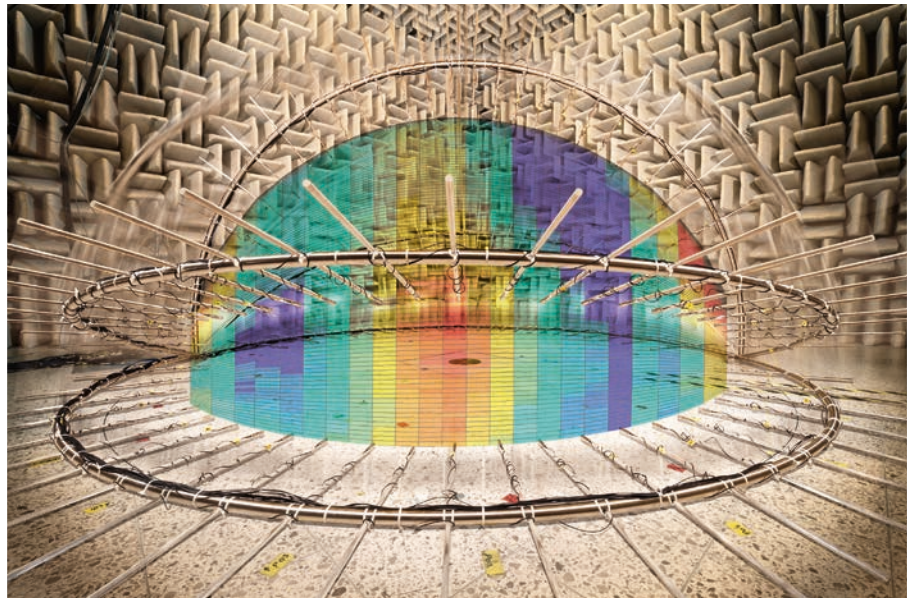
PTB participates in 583 international bodies, among these 227 in the field of standardization. PTB heads a total of 89 of these bodies.





# Abteilung 1

## Mechanik und Akustik



Die Abteilung 1 ist sehr stark in Aufgaben des gesetzlichen Messwesens eingebunden. Ein Schwerpunkt der Abteilung lag bei der Umsetzung des neuen Mess- und Eichgesetzes sowie der neuen Mess- und Eichverordnung mit umfangreichen Beratungsaktivitäten für Eichbehörden und Gerätehersteller. Weitere Schwerpunkte waren die Planung des Kompetenzzentrums „Windenergie“ und das abteilungsübergreifende Avogadroprojekt zur Neudefinition der SI-Einheit Kilogramm.

Die Arbeiten der Abteilung 1 können den drei Themenbereichen „Masse und abgeleitete Größen“, „Durchfluss“ sowie „Akustik, Ultraschall, Beschleunigung“ zugeordnet werden. 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 und 1.7 – basierend auf Einheiten- und Zeitgesetz, dem Mess- und Eichgesetz und dem Beschussgesetz sowie den jeweiligen Durchführungsbestimmungen – an der Darstellung und Weitergabe der mechanischen Einheiten für die Masse, die Kraft, das Drehmoment und den dynamischen Druck gearbeitet.

Zu den Kernaufgaben des Fachbereichs 1.1 gehören in der Arbeitsgruppe *Darstellung Masse* die Darstellung und Weitergabe der SI-Basiseinheit Kilogramm im Bereich von 1 mg bis 5000 kg sowie in den Arbeitsgruppen *Waagen*, *Dynamisches Wägen* und *IT-Wägetechnik* die Prüfung von nichtselbsttätigen und selbsttätigen Waagen sowie Waagenmodulen.

Neben den Kernaufgaben war die Vorbereitung auf eine mögliche Neudefinition des Kilogramms ein zentrales Thema in der Arbeitsgruppe *Darstellung Masse*. Die Arbeiten im Rahmen der EMRP-Projekte SIB03 „kNOW“ und SIB05 „NewKILO“ (European Metrology Research Programme,

www.emrponline.eu, call 2011) wurden abgeschlossen. Höhepunkt war sicherlich der Abschluss der Arbeiten zur Bestimmung der Masse der  $^{28}\text{Si}$ -Kugeln Avo28-S5c und -S8c mit einer relativen Standardmessunsicherheit von  $7 \cdot 10^{-9}$ . Dazu wurden Messungen sowohl in Luft als auch im Vakuum durchgeführt. Darüber hinaus wurden im Rahmen der Vorbereitung des PTB-Workshops „Round and Ready“ (geplant für 06/2016) Methoden und Werkzeuge zur Handhabung von Si-Kugeln intensiv diskutiert und untersucht.

Die Prüfung der in der *mise en pratique* vorgeschlagenen Methoden zur Weitergabe der Einheit nach einer möglichen Neudefinition des Kilogramms ist Inhalt einer internationalen Pilotstudie, an der die PTB teilnehmen wird. Aktuell wurden vorbereitende Messungen durchgeführt, um die entsprechenden Transfornormale für die vorgesehenen Vergleichsmessungen zu charakterisieren. Die Durchführung der Studie wird eine wichtige Aufgabe für das nächste Jahr sein.

In Vorbereitung der Neudefinition des Kilogramms wurden die offiziellen Kopien des Internationalen Kilogrammprototyps und die Arbeitsnormale des BIPM (Bureau International des Poids et Mesures) mit dem Internationalen Kilogrammprototyp verglichen. Im Ergebnis dieser außerordentlichen Kalibrierungen zeigte sich eine signifikante Abnahme der Masse der Arbeitsnormale des BIPM seit der 3. periodischen Verifikation der nationalen Kilogrammprototypen (1988–1992), die zu systematischen Abweichungen bei der Weitergabe der Masseneinheit durch das BIPM geführt hat (siehe International Report *News from the BIPM laboratories: 2014*, Los Arcos, Stock, Wielgosz, Arias, Milton, 2015 *Metrologia* 52, 1, S. 155ff). Das BIPM hat der PTB die relevanten Korrekturwerte für die Prototypen der Bundesrepublik Deutschland im Frühjahr 2015 mitgeteilt. In der Folge wurden die betroffenen Kunden informiert und auf Wunsch eine entsprechende Anpassung der Zertifikate vorgenommen. Die festgestellten Veränderungen müssen zudem bei dem noch laufenden internationalen Vergleich CCM.M-K7 berücksichtigt werden, weshalb sich der Abschluss des Vergleichs verzögern wird. Auf den Abschluss der Vergleichsmessungen der DKD- und EURAMET-Laboratorien zu magnetischen Eigenschaften von Gewichtsstücken hatte dies hingegen keinen Einfluss (DKD – Deutscher Kalibrierdienst, EURAMET – European Association of National Metrology Institutes).

Titelbild:

Räumliche Verteilung des vom primären Schalleistungsnormale erzeugten Schalldruckpegels, gemessen mit einer 24-kanaligen schwenkbaren Mikrofonanordnung

Erläuterung: Das primäre Schalleistungsnormale ist im Zentrum der Halbkugelhüllfläche im Halbfreifeldraum der PTB bodengleich angeordnet. Dargestellt sind die Schalldruckpegel bezogen auf den Hüllflächenmittelwert bei der Frequenz 800 Hz. Die Farbkodierung verläuft von –0,5 dB bis 0,5 dB von blau nach rot.

Am 1.1.2015 traten das neue deutsche Mess- und Eichgesetz (MessEG) und die zugehörige Mess- und Eichverordnung (MessEV) in Kraft. Die Tätigkeiten der Arbeitsgruppen im Arbeitsgebiet *Waagen* (Arbeitsgruppen 1.12 *Waagen*, 1.13 *Dynamisches Wägen* und 1.14 *IT-Wägetechnik*) wurden dadurch vergleichsweise wenig berührt, da Waagen im gesetzlichen Messwesen überwiegend durch europäische Richtlinien geregelt sind. Im Bereich der national geregelten „Eiersortiermaschinen“ wurde weiterer Klärungsbedarf identifiziert, weshalb eine entsprechende Projektgruppe vom Regelermittlungsausschuss (REA) eingerichtet wurde, die Ende 2015 ihre Arbeit aufgenommen hat. Die PTB wird selbstverständlich auch in Zukunft für Fragestellungen, die sich bezüglich Waagen im Rahmen des gesetzlichen Messwesens (MessEG/MessEV) ergeben, für alle interessierten Kreise als Ansprechpartner zur Verfügung stehen.

Stärkere Auswirkungen auf die Arbeit der Waagen-Arbeitsgruppen haben die neuen (bzw. überarbeiteten) europäischen Richtlinien für Messgeräte („MID“ 2014/32/EU, selbsttätige Waagen nach Anhang VIII) und für nichtselbsttätige Waagen („NAWID“, 2014/31/EU). Die für das Inverkehrbringen von Messgeräten entscheidenden Passagen dieser Richtlinien treten im April 2016 in Kraft. Es ist Ziel der Arbeitsgruppen, durch einen intensiven Austausch mit den Eich- und Marktüberwachungsbehörden und durch einen frühzeitigen Informations- und Beratungsprozess mit den betroffenen Geräteherstellern und der Fachabteilung „Wägetechnik“ im Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau (VDMA) mögliche Probleme so früh wie möglich zu identifizieren und bereits im Vorfeld entsprechend zu reagieren. Beispielhaft seien hier entsprechende Vorträge auf gemeinsamen Veranstaltungen und individuelle Beratungsgespräche genannt.

Nicht nur seitens der Regelsetzung, sondern auch technisch gab es im Jahr 2015 im Bereich der Waagen Veränderungen. Die lang erwartete Revision der Norm EN 45501 für Nichtselbsttätige Waagen wurde im Sommer verabschiedet und im Herbst offiziell als europäisch harmonisierte Norm von der Europäischen Kommission bestätigt. Hier wurden die Gerätehersteller schon während des Überarbeitungsprozesses durch die PTB auf die zu erwartenden Änderungen hingewiesen und entsprechend vorbereitet.

Im Sommer 2015 stand die erste große Wiederholungsbegutachtung im Rahmen des OIML Mutual

Acceptance Arrangement (OIML-MAA) an. Durch den Nachweis funktionierender QM-Systeme bei den ausstellenden Laboratorien sollen die im Rahmen des OIML-MAA ausgestellten Zertifikate ein höheres Vertrauensniveau der Zertifikatsnutzer ermöglichen. Die Laboratorien des PTB-Waagenbereichs sind hier als „Issuing Participant“ für Wägezellen nach OIML R60 und für nichtselbsttätige Waagen nach OIML R76 akzeptiert. Die beiden Gutachter aus den Niederlanden und Frankreich konnten die Eignung des Personals, der Laboreinrichtung sowie des zugehörigen Qualitätsmanagements für die Aufgaben im Rahmen des OIML-MAA grundsätzlich bestätigen. Sie zeigten darüber hinaus einige Verbesserungsmöglichkeiten auf, die zurzeit umgesetzt werden.

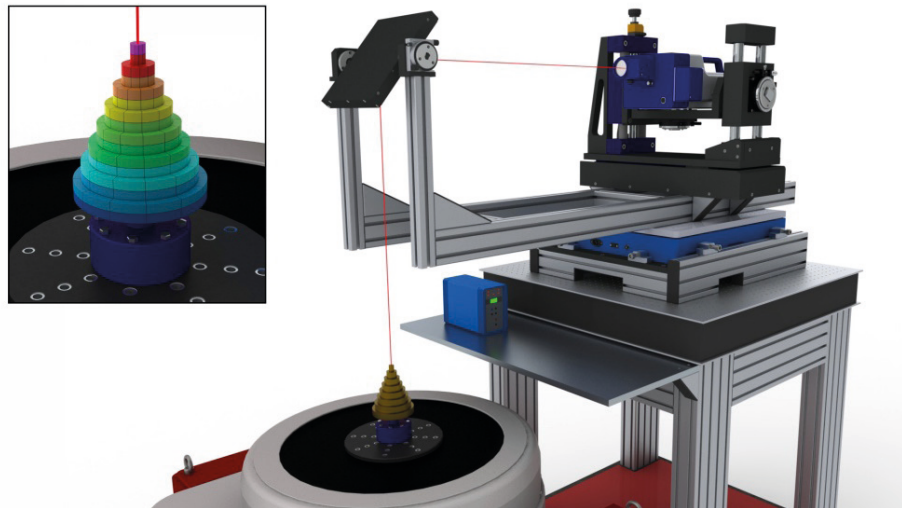
Die von der Arbeitsgruppe 2 der WELMEC (Vereinigung zur europäischen Zusammenarbeit im gesetzlichen Messwesen) im Jahr 2014 vorgeschlagene Änderung der Guide-Struktur wurde im Wesentlichen vom WELMEC-Komitee gebilligt. Es gilt nun, neue Guides zu entwickeln, die eine Umsetzung des „Freiwilligen Systems zur modularen Bewertung von Messgeräten“ (WELMEC Guide 8.8) ermöglichen. Neben dem britischen Institut NMO und dem niederländischen Institut VSL-NMI ist die PTB in den entsprechenden Arbeitsgruppen zur Neugestaltung der Guides besonders aktiv, teilweise auch federführend. Es ist herausfordernd, die technischen und administrativen Aspekte der bestehenden Guides zu trennen und Einigkeit über die Vorschläge zu erreichen. In diesem Jahr standen die „Kassensysteme“ im Fokus. Im nächsten Jahr sollen die Festlegungen für „Wägezellen“ entsprechend überarbeitet werden. Der Austausch mit den anderen europäischen Kollegen hinsichtlich einer harmonisierten Umsetzung der Richtlinienfestlegungen ist aufgrund länderspezifischer Interpretationen anspruchsvoll, aber wichtig für die Gerätehersteller und die Verbraucher in Deutschland und Europa.

Im Fachbereich 1.2 *Festkörpermechanik* werden mit Kraft-Normalmessenrichtungen Kräfte von 0,5 N bis 16,5 MN und mit Drehmoment-Normalmessenrichtungen Drehmomente von 1 mN · m bis 1,1 MN · m realisiert. Die Weitergabe dieser Einheiten erfolgt über die Kalibrierung von Kraft- und Drehmomentmessgeräten in den Normalmessenrichtungen.

In der Arbeitsgruppe 1.21 *Darstellung Kraft* werden in Kraft-Normalmessenrichtungen (K-NME) mit höchster Präzision Kräfte erzeugt, um damit Kraftmessgeräte als Transfernormale zu kalibrieren.



Bild 1: Schwingerregersystem mit Scanningvibrometer zur Messung dynamischer Kräfte



Dabei werden mit direkter Massewirkung über den Messbereich von 0,5 N bis 2 MN relative erweiterte Messunsicherheiten von 0,002 % erreicht. Bei noch größeren Kräften bis 16,5 MN werden mit dem Prinzip der hydraulischen Übersetzung relative erweiterte Messunsicherheiten von 0,01 % erzielt. Um zukünftig die Rückführung noch größerer Kräfte sicherzustellen, können durch Parallelschaltung von Kraftmessgeräten zu sogenannten Build-Up-Systemen Kräfte bis 30 MN und 50 MN gemessen werden. Im Rahmen des durch die PTB koordinierten EMRP-Projektes SIB63 „Force Metrology“ (<http://www.ptb.de/emrp/forcemetrology.html>) werden hierfür die auftretenden Einflussfaktoren ausgiebig untersucht. Die Zielsetzung ist dabei, im obersten Kraftbereich die Messunsicherheiten durch geeignete Modelle zu reduzieren. Gerade in diesem Kraftbereich ist die Vernetzung mit anderen NMIs und Instituten in Europa und weltweit von großer Bedeutung, um den zukünftigen Anforderungen der messtechnischen Rückführung noch größerer Kräfte gerecht zu werden. In der PTB können für Zug- und Druckkräfte die Kraft-Normalmesseinrichtungen bis 16,5 MN eingesetzt werden, die auch für die Kalibrierung der PTB-Build-up-Systeme für 30 MN und 50 MN zum Einsatz kommen.

Um den zukünftigen Anforderungen der Kraftmessung in Anwendungen und Prüfständen gerecht zu werden, wurde am 1.3.2015 die neue Arbeitsgruppe 1.23 *Kraftmesstechnik* gegründet. Die Arbeitsgruppe bearbeitet neben dem derzeit laufenden EMRP-Projekt insbesondere Fragestellungen zur Weiterentwicklung und zur Verbesserung der Kraftmesstechnik sowie der Messverfahren zur Weitergabe der Kraftskala in Anwendungen insbesondere für große Kräfte. Die bisherigen Aufgaben der früheren Arbeitsgruppe 1.23 *Periodische Kräfte* auf dem Gebiet der dynamischen Kraftmessung

wurden von der Arbeitsgruppe 1.21 übernommen, sodass die Arbeitsgruppe 1.21 jetzt nicht nur für die Rückführung statischer, sondern auch dynamischer Kräfte (periodischer Kräfte) zuständig ist. Mit einem 10-kN-Schwingerregersystem und einem Scanningvibrometer (Bild 1) können z. B. die dynamischen Kräfte ermittelt werden, die auf einen Kraftaufnehmer wirken, wenn dieser zusammen mit angekoppelten Zusatzmassen zu Schwingungen angeregt wird. Die dynamische Kraft wird dabei aus der wirksamen Massen- und Beschleunigungsverteilung ermittelt, sodass Kraftmessgeräte dynamisch kalibriert werden können. Darüber kann auch das Resonanzverhalten des Kraftaufnehmers sowie dessen Steifigkeit und Dämpfung bestimmt werden.

Die Arbeitsgruppe 1.22 *Darstellung Drehmoment* deckt mit den Drehmoment-Normalmesseinrichtungen die Drehmomentskala von 1 mN · m bis 1,1 MN · m ab, wobei auch hier die kleinsten relativen erweiterten Messunsicherheiten von 0,002 % bei der 1-kN · m- und bei der 20-kN · m-Anlage über Hebel-Masse-Prinzipien erreicht werden.

Bei kleineren Anlagen im unteren Messbereich  $< 1 \text{ N} \cdot \text{m}$  sind zusätzliche Einflussgrößen wie z. B. Reibung zu berücksichtigen und bei größeren Anlagen bis 1,1 MN · m werden relative Messunsicherheiten von 0,08 % durch die Verwendung von Hebel-Kraftaufnehmer-Prinzipien erreicht.

Im Zusammenhang mit den in Windenergieanlagen auftretenden sehr großen Drehmomenten von mehreren MN · m steigt der Bedarf nach der Rückführung immer größerer Drehmomente, für die es derzeit weltweit noch keine Kalibriermöglichkeiten gibt. Vor diesem Hintergrund wurde im September 2015 das von der PTB koordinierte EMPIR-Projekt 14IND14 „Torque measurement in the MN · m ran-





Bild 2: Teilnehmer des EMPIR-Kick-Off-Meetings im Oktober 2015 vor der 1,1-MN · m-Drehmoment-Normalmesseinrichtung und dem 5-MN · m-Drehmomentaufnehmer

ge“ (<http://www.ptb.de/empir/torquemetrology.html>) gestartet. Im Oktober fand dazu das Kick-Off-Meeting statt (Bild 2). In diesem Projekt entwickelt und untersucht die PTB zusammen mit anderen NMIs – CEM (Spanien), CMI (Tschechische Republik) und VTT (Finnland) – sowie externen Projektpartnern (CENER, RWTH, FhG) neue Verfahren zur Rückführung und Kalibrierung von großen Drehmomentaufnehmern und großen Prüfständen. Insbesondere hat die PTB für dieses Projekt einen neuen 5-MN · m-Drehmomentaufnehmer mit insgesamt 8 DMS-Vollbrücken als Mehrkomponentenaufnehmer ( $2 \times M_z, M_y, M_x, 2 \times F_z, F_y, F_x$ ) beschafft, der im Rahmen des Projektes zunächst in Teilbereichen ausgiebig untersucht und charakterisiert wird. Eine große Herausforderung sind dabei die messtechnischen Untersuchungen des Aufnehmers in der 1,1-MN · m-Drehmoment-Normalmesseinrichtung der PTB, mit denen bereits begonnen wurde, die Extrapolation der Messbereiche sowie die späteren Untersuchungen an dem 4-MW-Gondelprüfstand der RWTH Aachen (<https://www.cwd.rwth-aachen.de/>).

Neben dem vom Fachbereich 1.2 neu eingeworbenen EMPIR-Projekt laufen als abteilungsübergreifender Schwerpunkt der Abteilungen 1 und 5 die Ausführungs- und Realisierungsplanungen für ein Kompetenzzentrum Windenergie. Die Grundlage bildet das Energiekonzept der PTB, das 2012 vorgestellt wurde.

Inhaltliche Schwerpunkte bilden die Messung geometrischer Bauteile aus dem Antriebstrang von Windkraftanlagen, wie Lager, Wellen, Getriebeteile oder Bremscheiben mit Bauteilabmessungen von 5 m × 4 m × 2 m. Darüber hinaus werden Pläne und Konstruktionen zum Aufbau einer 5-MN · m-Drehmoment-Normalmesseinrichtung erarbeitet, um zukünftig so große Drehmomentaufnehmer wie in dem EMPIR-Projekt über den ganzen Messbereich kalibrieren zu können. Bild 3 zeigt die erste Konstruktion einer 5-MN · m-Drehmoment-Normalmesseinrichtung sowie FEM-Simulationen des Belastungsverlaufs im Antriebs- und Messstrang der Anlage. Dritter Schwerpunkt ist die Erprobung und die Realisierung einer neuen Wind-LIDAR-Messeinrichtung des Fachbereiches 1.4 Gase.

Bild 3: Konstruktionsentwurf einer 5-MN · m-Drehmoment-Normalmesseinrichtung

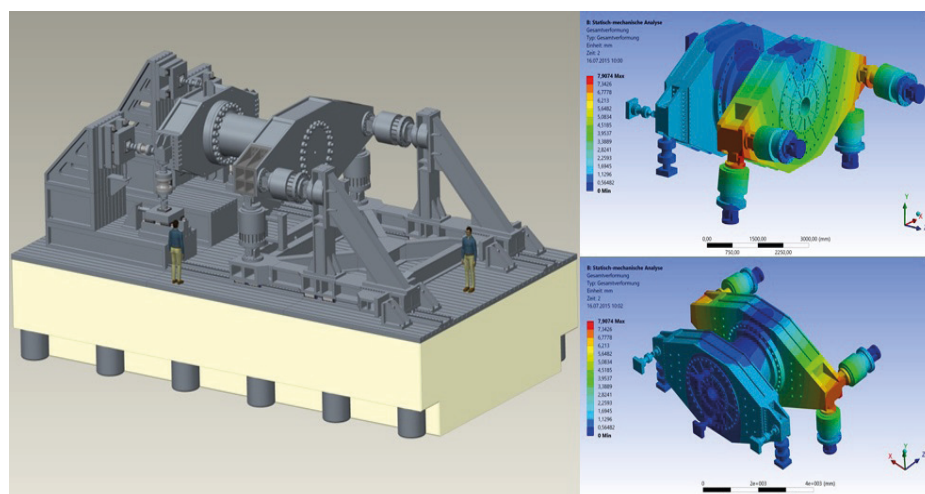
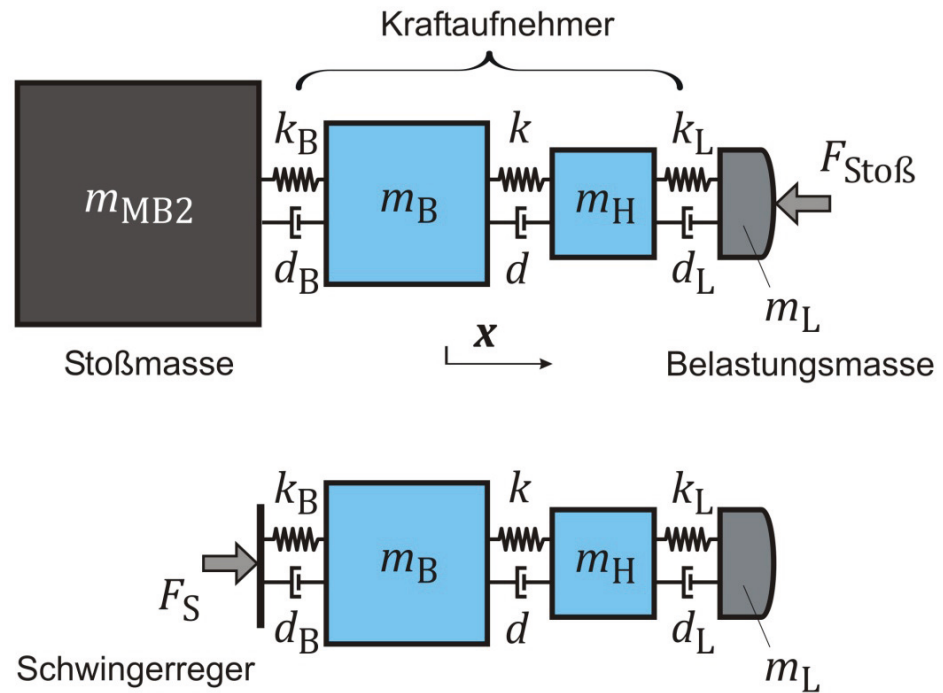


Bild 4: Modellbasierte Kalibrierung von Kraftaufnehmern: Modell der Stoß- (oben) und Sinuskalibrierung (unten)



Im Fachbereich 1.2 wird neben den Einzelgrößen Kraft bzw. Drehmoment auch die Überlagerung von Größen als Mehrkomponentenmessung untersucht. Insbesondere steht für die 1-MN-Kraft-Normalmesseinrichtung mit Kräften von 20 kN bis 1 MN (relative erweiterte Messunsicherheit  $2 \cdot 10^{-5}$ ) ein Hebel-Masse-System als Zusatzeinrichtung zur Verfügung, mit dem überlagert zur axialen Kraft jetzt auch Drehmomente bis zu  $2 \text{ kN} \cdot \text{m}$  (relative erweiterte Messunsicherheit  $2 \cdot 10^{-4}$ ) erzeugt werden können. Nach der Fertigstellung und messtechnischen Validierung folgt im Rahmen einer Kooperation mit dem Deutschen Schraubenverband die Untersuchung von Reibwertmessköpfen unterschiedlicher Hersteller.

Im Themenbereich der dynamischen Messung mechanischer Größen konnte durch Untersuchungen der AG 1.73 *Stoßdynamik* erstmals die Übereinstimmung von Kalibrierergebnissen eines Kraftaufnehmers mit aus Stoß- und Sinus-Messungen gewonnenen Daten gezeigt werden.

Neue Untersuchungen zur modellbasierten Kalibrierung von Kraftaufnehmern haben gezeigt, dass sich die bislang nicht konsistenten Ergebnisse aus Stoß- und Sinuskalibrierungen erklären und in Übereinstimmung bringen lassen, wenn das mechanische Modell eine beidseitig elastische Ankopplung des Kraftaufnehmers vorsieht (siehe Bild 4). Hierzu wurden Experimente mit stoß- und sinusförmiger Kraftanregung und angekoppelten, unterschiedlich großen Belastungsmassen exemplarisch an einem

Kraftaufnehmer mit hoher Bandbreite durchgeführt und das Resonanzverhalten analysiert.

Ebenfalls über einen modellbasierten Ansatz wurde erstmals die dynamische Kalibrierung eines Drehmomentenaufnehmers realisiert. Die im Rahmen einer nun abgeschlossenen Dissertation durchgeführten Messungen nutzten sinusförmige Anregungen in einem Frequenzbereich von etwa 10 Hz bis 350 Hz. Die Eigenschaften des Aufnehmers werden in Form von Modellparametern eines mechanischen Modells quantifiziert, wobei die Modellparameter anhand der Messdaten bestimmt werden. Einflüsse durch weitere elektronische Komponenten in der Messkette wurden durch Kalibrierungen vorher bestimmt und kompensiert.

## 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.

In der Arbeitsgruppe *Strömungsmesstechnik* des Fachbereiches 1.4 *Gase* wurden die mit LDA-Systemen als Bezugsnormalen durchgeführten Untersuchungen zur Kalibrierung von Prandtl'schen Staurohren (Pitot static tubes) fortgesetzt und durch Vergleichsmessungen mit anderen Kalibriereinrichtungen erweitert. Hierdurch soll langfristig

die Vergleichbarkeit von Kalibrierergebnissen für Prandtl'sche Staurohre und deren Nutzung als Bezugsnormale auf höchstem Niveau sichergestellt werden. In diesem Zusammenhang wird derzeit eine DKD-Ringvergleichsmessung mit allen DAkkS-akkreditierten Kalibriereinrichtungen durchgeführt und von Seiten der PTB betreut.

In dem vom BMWi im Zentralen Innovationsprogramm Mittelstand (ZIM) geförderten Projekt „Entwicklung von Profilsensoren für Laser-Doppler-Velocimeter (LDV)“ mit der Technischen Universität Dresden, der ILA-GmbH und der Optolution Messtechnik GmbH konnte das von der PTB zu entwickelnde Erweiterungsmodul für kommerzielle LDV-Systeme zur Messung von Strömungsgeschwindigkeitsprofilen hinsichtlich der zu erwartenden Ortsauflösung charakterisiert werden.

Im MNPQ-Projekt „Transfer-Wind-LIDAR“ wurden erfolgreiche erste Vergleichsmessungen auf dem Testfeld des Kooperationspartners Deutsche WindGuard Consulting GmbH durchgeführt. Hierfür musste im Vorfeld eine wetterfeste und temperaturstabile Einhausung auf einem PKW-Anhänger für das noch in der Entwicklung befindliche LIDAR-Transfornormal gefertigt werden. Trotz ungünstiger Windbedingungen wurden für die gemittelten Geschwindigkeitswerte in einer Messhöhe von 100 m Abweichungen von lediglich ca. 1 % zwischen den vom Messmast und vom LIDAR-System gelieferten Messwerten festgestellt.

Die wachsende Bedeutung an rückführbaren Messungen von Strömungsgeschwindigkeitswerten hat sich in einer Zunahme an DAkkS-Begutachtungsaufträgen und in einer Zunahme an Beratungsaktivitäten im Rahmen der technischen Zusammenarbeit widerspiegelt.

Die Arbeitsgruppe *Gasmessgeräte* hat ein Wirkdruckmesssystem zugelassen, das erstmals eine eichfähige Abrechnung und Belieferung von Wasserstoffmengen mittels Tankfahrzeugen ermöglicht. Das zugelassene System erlaubt im Betrieb einen maximalen Druck von 210 bar und einen maximalen Durchfluss von 20 kg/min. Die Verpflichtung des Industriegasverbandes (IGV), sämtliche im Bestand befindlichen Transportfahrzeuge mit eichfähiger Messtechnik auszustatten, machte ein entsprechendes Zulassungsverfahren erforderlich.

Für die Einspeisung von aufbereitetem Biomechan in Erdgasnetze ist eine Abscheidung von CO<sub>2</sub> aus dem Rohbiogas erforderlich. Im Rahmen des



Bild 5: Biogasaufbereitungsanlage mit dem PTB-Messanhänger im Vordergrund

MONA-Verbundvorhabens wurde für die messtechnische Beurteilung der Abscheidung ein autark arbeitender Messanhänger inkl. geeigneter Messtechnik konzipiert, validiert und bei insgesamt acht mehrwöchigen Messkampagnen an Biogasaufbereitungsanlagen erfolgreich eingesetzt. Die erreichbare Messunsicherheit der Mengenummessung des Abgases lag abhängig von der anlagenspezifischen Situation i. d. R. unter 2 %. Bei ungünstigen Verhältnissen erhöhte sich die Messunsicherheit auf  $U \leq 3 \%$ . Die im Projekt vorgegebenen Ziele für die mobile Messanlage, die auch im Anschluss des Projektes der PTB für weitere Messaufgaben zu Verfügung steht, konnten erreicht werden.

Vor dem Hintergrund, dass die metrologisch abgesicherte Messung von technischen Gasen zunehmend an Bedeutung gewinnt und die Rückführung für industrielle Anlagen sowie für Prüfstände von akkreditierten Laboratorien zunehmend nachgefragt wird, wurden im Bereich der Mengenummessung von technischen Gasen bilaterale und multilaterale Vergleichsmessungen mit Wasserstoff und Stickstoff durchgeführt. Die vorläufigen Ergebnisse haben bereits gezeigt, dass mit der zur Verfügung stehenden Messtechnik die CMC-Unsicherheiten bestätigt werden.

Im Zuge der Umsetzung des neuen Mess- und Eichgesetzes und seiner Verordnung ist erheblicher Beratungsaufwand für die Eichbehörden, die Gerätehersteller und -verwender entstanden. Dies betraf insbesondere die Anwendung der Bewertungsmodule und die Abläufe der Konformitätsbewertung sowie Auslegungsfragen der Verordnung wie deren Geltungsbereich und die Rechte und Pflichten der Akteure.



Das Primärnormal für Hochdruck-Erdgas (Rohrprüfstrecke) stand 2015 für die Arbeitsgruppe *Hochdruck-Gas* im Mittelpunkt bilateraler Vergleichsmessungen mit dem NIM (China) und mit dem LNE-LADG (Frankreich). Hierbei wurden zur Abdeckung eines Durchflussbereiches von 3 m<sup>3</sup>/h bis 200 m<sup>3</sup>/h fünf kritisch betriebene Düsen als Transfernormale eingesetzt. Die Kalibrierung mit der Rohrprüfstrecke erfolgte in einem Druckbereich von 0,8 MPa bis 5 MPa mit Erdgas. Ergänzend wurden bei der PTB noch Messungen mit Luft bis 0,6 MPa durchgeführt. Die Vergleichspartner verwendeten jeweils als Primärnormale sogenannte pVTt-Systeme, die mit Luft betrieben werden. Sie decken einen Druckbereich von 0,1 MPa bis 2,5 MPa (NIM) sowie 0,2 MPa bis 4 MPa (LNE-LADG) ab. Wie in den unten gezeigten Grafiken beispielhaft für zwei der Düsen dokumentiert ist, ergab sich über den gesamten Messbereich eine sehr gute Äquivalenz. Die PTB wird auf der Basis der positiven Ergebnisse den CMC-Eintrag für Hochdruck-Erdgas erweitern und zukünftig die Weitergabe der Einheit auch direkt vom Primärnormal aus für Dritte mit einer Messunsicherheit von 0,1 % vom Messwert anbieten.

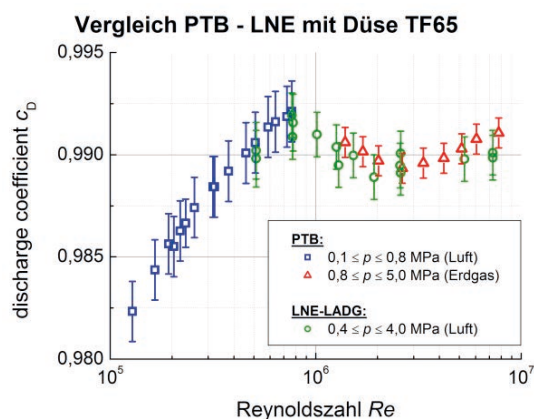
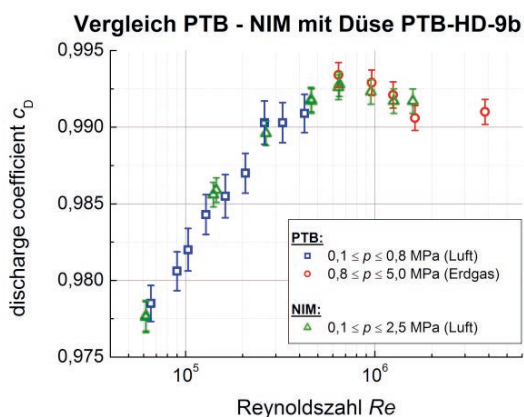


Bild 6: Ergebnisse der Vergleiche PTB–NIM (links) und PTB–LNE (rechts)

Der Einfluss der Fluideigenschaften auf die Kalibrierwerte von Messgeräten ist eine weitere wichtige Thematik, die 2015 zunächst für mechanische Messgeräte in Angriff genommen wurde. Für die im Gastransport verbreiteten Turbinenradgaszähler konnte die Formulierung eines fluid-mechanischen Modells weiterentwickelt und verifiziert werden, so dass allein basierend auf speziellen Tests mit atmosphärischer Luft zuverlässige Aussagen über die Abhängigkeit von der Gasart gemacht werden können. Dies ist ein wichtiger Schritt z. B. für die Bewertung der Eignung dieser Messgerätetechnologie für stark wasserstoffhaltige Gase im Zusammenhang mit Power-to-Gas-Einspeisungen ins Erdgasnetz oder aber für die Weitergabe der Einheit mit geringerer Messunsicherheit für Prüfstände mit anderen Medien.

Der Fachbereich 1.5 *Flüssigkeiten* bearbeitet ein sehr breites Aufgabenspektrum aus allen Geschäftsbereichen der PTB. Im Dienstleistungsbereich stehen das Einheiten- sowie das Mess- und Eichgesetz und deren Verordnungen im Mittelpunkt. Forschung und Entwicklung konzentrieren sich auf die Neu- und Weiterentwicklung von Mess- und Prüfverfahren für Flüssigkeitsmessgeräte und derzeit auch auf die maßgebliche Gestaltung internationaler Vergleichsmessungen der nationalen Normale der Flüssigkeitsmessung.

Für die Arbeitsgruppe 1.51 *Flüssigkeitsmessgeräte*, zu deren Aufgabefeldern die Zulassung und Konformitätsbewertung von Flüssigkeitsmessgeräten gehört, brachte die Novellierung des Mess- und Eichgesetzes 2015 zusätzliche Herausforderungen. Im besonderen betraf dies hierbei die Messgeräte für ruhende Flüssigkeiten, also Lagerbehälter und Tankwagen sowie deren Messeinrichtungen, für die an die Stelle der bisherigen nationalen Zulassungen nun Konformitätsbewertungen nach der neuen Mess- und Eichverordnung treten. Aber auch generell besteht ein hoher Beratungsbedarf für Eichbehörden, Gerätehersteller und -anwender ebenso wie bei Verbänden und Konsumenten zu Fragen der konkreten Umsetzung der Verordnung und im Zusammenhang mit der Neuformierung der Vollversammlung.

Normungs- und Gremienarbeit als fester Bestandteil der Arbeit im gesetzlich geregelten Bereich bedeutet auch eine aktive Mitwirkung an den entsprechenden internationalen Dokumenten, insbesondere der OIML. Nach Fertigstellung der OIML-Empfehlung R 117 für Messanlagen für Flüssigkeiten außer Wasser im vergangenen Jahr stand 2015 die Erarbeitung der Teile 2 und 3 der OIML R 80 für Straßen- und Schientankwagen mit automatischer Füllstands-



messung auf der Tagesordnung. In beiden Fällen agiert 1.5 als Convenor.

Möglichkeiten der Optimierung der Standzeiten von Wasserzählern in kommunalen Versorgungsnetzen wurden im Rahmen eines Forschungsvorhabens mit dem Wasserversorger „Hamburg Wasser“ untersucht. Erstes Ergebnis ist die messtechnische Begründung eines Vorschlages, künftig auch Wohnungswasserzähler in das bisher nur für Hauswasserzähler praktizierte Stichprobenverfahren zur Verlängerung der Eichgültigkeitsdauer aufzunehmen, wodurch nachhaltig positive Effekte für Verbraucher- und Umweltschutz erwartet werden.

In den Aufgabenbereich der Arbeitsgruppe 1.52 *Flüssigkeitsprüfstände* fallen sowohl die Sicherstellung der Betriebsbereitschaft als auch die Neu- bzw. Weiterentwicklung der Flüssigkeitsnormalmeseinrichtungen des gesamten Fachbereichs. Die Arbeiten am und mit dem Hydrodynamischen Prüffeld sind derzeit auf die Erweiterung der Prüfmöglichkeiten bei großen Durchflüssen über 1000 m<sup>3</sup>/h und großen Nennweiten von DN 300 und DN 400 unter nicht idealen Prüfbedingungen gerichtet. Untersucht wurde beispielsweise der Einfluss verschiedener Vorstörungen wie Raumkrümmer, Drall erzeuger und Rohrquerschnittsreduzierungen auf das Messverhalten von in unterschiedlichen Abständen nachgeschalteten Durchflussmessgeräten. Bild 7 zeigt beispielhaft aktuelle Messergebnisse in Form der Differenzen der Durchflussanzeige für eines der geprüften Geräte mit und ohne Vorstörung. Veränderte Zuströmbedingungen können offensichtlich zu Anzeigeänderungen im Bereich einiger Prozent führen.

Mit dieser Erweiterung der Prüfmöglichkeiten wird das HDP auch bei großen Durchflüssen nun nicht nur für die Kalibrierung von Durchflussmessgeräten unter idealen Strömungsbedingungen als reguläre Dienstleistung genutzt, sondern erstmals und zunehmend auch im Rahmen von Forschungsk Kooperationen mit Geräteherstellern zur Reduzierung des Strömungseinflusses auf die Geräte bereits während der Entwicklungsphase bzw. zur Definition notwendiger Installationsbedingungen der Geräte für deren Einsatz vor Ort, damit sie auch unter den real existierenden Strömungsverhältnissen innerhalb der zulässigen Fehlergrenzen bleiben.

Weitere interessante Forschungsk Kooperationen mit der Industrie laufen derzeit zu Fragen der besseren Abbildung der realen Messbedingungen, unter denen Flüssigkeitsmessgeräte üblicherweise verwendet werden, in den derzeit vorgeschriebenen Prüf- und Überwachungsprozeduren. Dies betrifft beispielsweise die Messung des Trinkwasserverbrauchs im Haushaltsbereich ebenso wie die Kraftstoffverbrauchsmessung auf Motorenprüfständen der Automobilindustrie. Hierfür fehlen derzeit sowohl geeignete Messverfahren als auch experimentelle Prüfmöglichkeiten. Der Fachbereich konzentriert seine Forschungsaktivitäten hier deshalb insbesondere auf die Entwicklung komplett neuartiger Verfahren auf der Basis von Kavitationsdüsen in Verbindung mit speziellen, dynamisch betriebenen Kolbensystemen. Damit können erstmals frei wählbare Verbrauchsprofile reproduzierbar auch unter Laborbedingungen realisiert werden.

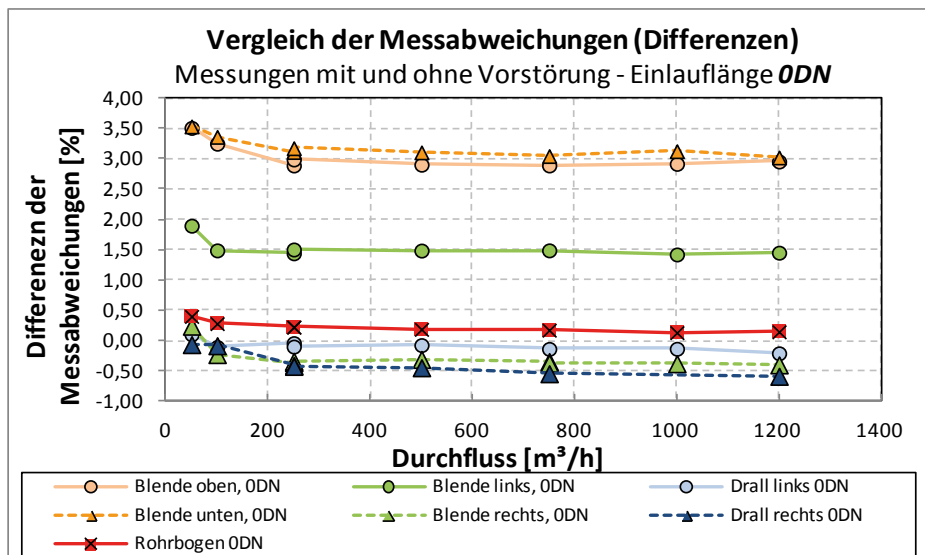


Bild 7: Prozentuale Abweichung der Anzeige eines Durchflussmessgerätes bei direkter Installation nach verschiedenen Rohrleitungsstörungen im Vergleich mit einer ungestörten Zuströmung

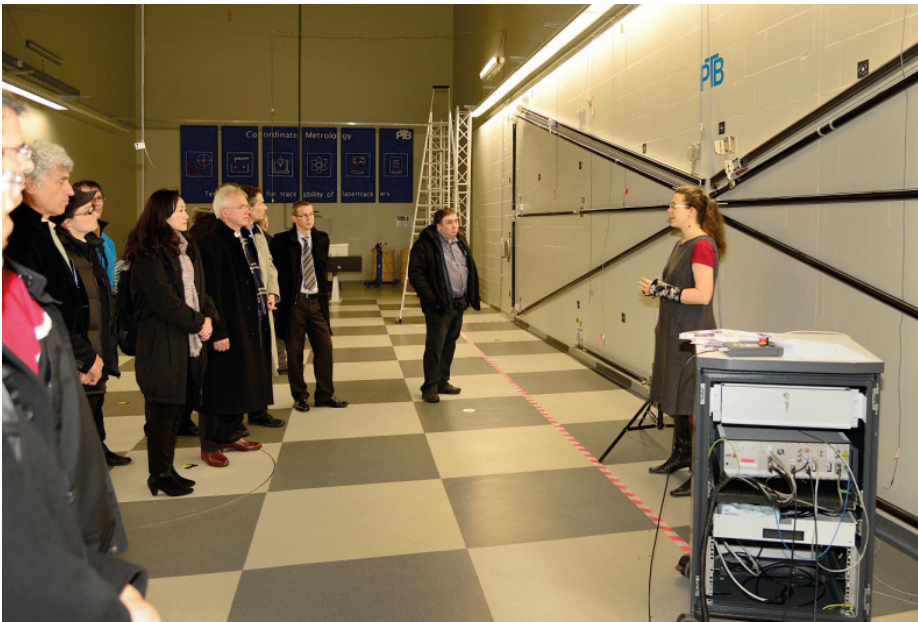


Bild 8: Erläuterung des 3D-Kalibrierverfahrens eines terrestrischen Laserscanners für die Lagertankvermessung an der Referenzwand der PTB vor den Mitgliedern der Sitzung des entsprechenden OIML TC8/SC2 „Static volume and mass measurement“

Im Fokus der Arbeitsgruppe 1.53 *Rückführung Flüssigkeitsmessung* stand der Start des BIPM-Schlüsselvergleichs CCM.FF-K1 für Wasser im Durchflussbereich von  $50 \text{ m}^3/\text{h}$  bis  $180 \text{ m}^3/\text{h}$  mit einer Nennweite von DN 100, für den die PTB als Pilotlabor fungiert. Nach wie vor besteht hierbei die größte messtechnische Herausforderung darin, entsprechend messstabile und robuste Transfornormale zu finden, die einen Nachweis der Messunsicherheiten der zu vergleichenden Prüfstände im Bereich von 0,02 % bis 0,04 % ermöglichen. Entsprechend aufwendig waren nicht nur die messtechnischen und organisatorisch-logistischen Vorbereitungsarbeiten, sondern ist nunmehr auch die Betreuung des gesamten Vergleichs durch das Pilotlabor. Dies betrifft vor allem die zeitnahe Aufarbeitung aller Messergebnisse der insgesamt 11 beteiligten Metrologieinstitute und der mehrmaligen planmäßigen Zwischenmessungen in der PTB, um mögliche Veränderungen an den Transfornormalen rechtzeitig erkennen zu können.

Zahlreiche sehr erfolgreiche Aktivitäten fanden auch im Rahmen der interdisziplinären Nutzung von Forschungsergebnissen aus anderen Bereichen der PTB statt. So konnte zum Beispiel erstmals eine 3D-Rückführung eines terrestrischen Laserscanners, der im gesetzlichen Messwesen zur geometrischen Vermessung großer Lagertanks eingesetzt wird, unmittelbar auf die Längennormale der PTB realisiert werden, wofür die im Fachbereich 5.3 entwickelte Referenzwand verwendet wurde (Bild 8).

### 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 dynamisch-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 1.6 *Schall* wird ein sehr breites Spektrum metrologischer Fragestellungen zur akustischen Messtechnik, zur Zulassung von Schallpegelmessern und -kalibratoren, zum Gehör und zum Ultraschall bearbeitet.

Dabei unterstützt der Fachbereich durch Gutachtertätigkeit die DAkkS bei der Akkreditierung von Laboratorien im Bereich der Akustik.

Im Rahmen des EMRP-Projekts „EARS“ wurden in interdisziplinärer Zusammenarbeit der Arbeitsgruppen *Hörschall* und *Geräuschesmesstechnik* mit den Fachbereichen *Biosignale* und *Medizinische Messtechnik* fundamentale Erkenntnisse zum Hören von tieffrequentem Schall (Frequenz  $f$  unter 125 Hz), Infraschall ( $f$  unter ca. 16 Hz bis 20 Hz) und Luftultraschall ( $f$  über 16 kHz) gewonnen: Es gelang der Nachweis der Aktivierung des auditiven Kortex bei tiefen Frequenzen bis herunter zu Infraschall von 8 Hz, nicht jedoch für Ultraschall-Frequenzen.

Bei der Beurteilung der Übertragungsqualität von Beschallungsanlagen wird häufig der Speech-Transmission-Index (STI) verwendet. In besonders komplizierten räumlichen Konstellationen ist seine Aussagekraft allerdings eingeschränkt. Um auch unter



Bild 9: Aufbau zur Ultraschallwechseldruckmessung mithilfe eines UHF-Vibrometers zur Kalibrierung von Hydrophonen

solchen Verhältnissen adäquate Aussagen über die zu erwartende Sprachverständlichkeit zu erhalten, entwickelt die Arbeitsgruppe *Hörschall* in einem ZIM-Kooperationsprojekt zusammen mit dem Partner „TAC Technische Akustik Korschenbroich“ eine binaurale Erweiterung des STI. Für die dazu



Bild 10: Interferenzen in der Schalldruckverteilung neben dem Ohr eines Kunstkopfes als Simulation eines Benutzers einer Ultraschallreinigungswanne, verursacht durch Reflexionen am Torso (gemessen im Portalscanner)

geplanten Hörversuche zur Ermittlung des Zusammenhanges zwischen STI und Sprachverständlichkeit wurde ein deutschsprachiges Testinstrumentarium entwickelt und validiert.

In der Arbeitsgruppe *Ultraschall* wurde mit dem Aufbau eines neuen Primärnormals für den Ultraschallwechseldruck begonnen. Dabei wird ein Hochfrequenz-Laservibrometer eingesetzt, welches den Schalldruck in einem Ultraschallfeld optisch bestimmt. Das Messverfahren realisiert dadurch die Anbindung des Ultraschallwechseldruckes in Pascal an die SI-Basiseinheiten (Meter und Sekunde). Es soll langfristig das vorhandene homodyne Interferometer ergänzen, um so den Frequenzbereich für primäre Hydrophonkalibrierungen auf bis zu 100 MHz erweitern und die Unsicherheiten im gesamten Frequenzbereich reduzieren zu können. Erste Kalibrierungen von Membranhydrophonen konnten mit unterschiedlichen Anregungssignalformen bereits erfolgreich durchgeführt werden.

In der Arbeitsgruppe *Geräuschmesstechnik* wurde die Bauartprüfung von Schallpegelmessgeräten an die Anforderungen des neuen Mess- und Eichgesetzes (MessEG) und der Mess- und Eichverordnung (MessEV) angepasst. Die Arbeitsgruppe führt nun das Modul B der MessEV als Baumusterprüfung durch und legt dabei die Anforderungen der neuen harmonisierten Schallpegelmessernorm DIN EN 61672 Teil 1-3 (2014) zugrunde.

Die bestehenden Messmöglichkeiten für Luftultraschall wurden um einen Kalibrierservice für 1/4"-Messmikrofone erweitert. Nun können Anwender und Hersteller Ultraschallmikrofone erstmals bis 100 kHz mit einer Unsicherheit von unter 0,5 dB auf ein Primärnormal zurückführen lassen. Damit sind nun auch rückgeführte Messungen z. B. an einem neu aufgebauten 3-Achsen-Portalscanner zur präzisen Vermessung realer Schallfelder mit hoher Ortsauflösung bis 100 kHz möglich.

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

Im Frühjahr 2015 wurde von der zuständigen ISO-Arbeitsgruppe die neue Norm ISO 16063-43 „Methods for the calibration of vibration and shock transducers – Part 43: Calibration of accelerometers by model-based parameter identification“ verabschiedet und damit für eine baldige Publikation freigegeben. Die Norm basiert auf Methoden, die maßgeblich von der AG 1.71 *Darstellung Beschleunigung*



nigung der PTB entwickelt wurden. Während die Norm in ihren Beispielen den Beschleunigungssensor als Ein-Massen-Schwinger beschreibt, arbeiten die Wissenschaftler der AG bereits an einer Verfeinerung der Methodik mittels erweiterter Modelle. Die bislang im Rahmen einer Dissertation erzielten Ergebnisse wurden beim IMEKO World Congress im September 2015 in Prag veröffentlicht.

Da jedoch nicht nur der Sensor an sich, sondern auch der Messverstärker innerhalb einer Messkette großen Einfluss auf eine dynamische Messung hat, werden in der AG auch entsprechende Verfahren zur Kalibrierung von Messverstärkern für dynamische Anwendungen entwickelt. Diese Verfahren werden derzeit im DKD-Fachausschuss „Kraft und Beschleunigung“ zusammen mit einigen betroffenen akkreditierten Laboren zu einer DKD-Richtlinie für verschiedene Messverstärkertypen zusammengefasst. Eine englische Übersetzung dieser deutschen Richtlinie soll parallel bei der ISO standardisiert werden.

Im Sinne einer Bestandsaufnahme hat die Arbeitsgruppe den Auftrag des Präsidiums übernommen, die Intensität von Bodenschwingungen auf dem PTB-Gelände zu erfassen. Zu diesem Zweck wurden mehrere Messkampagnen mit Unterstützung durch verschiedene andere Arbeitsgruppen der PTB durchgeführt und abschließend ein entsprechender Bericht verfasst.

Die Arbeitsgruppe *Angewandte Akustik* fokussierte sich im letzten Jahr auf die Darstellung und Weitergabe der Einheit Watt im Luftschall. Dazu wurde ein primäres Schalleistungsnormal entworfen, installiert und erprobt. Das Normal besteht aus

einem ebenen, in eine reflektierende starre Ebene eingebettet schwingenden Festkörper. Die von diesem Normal emittierte Schallleistung wird aus der räumlichen Verteilung der Schwinggeschwindigkeit berechnet, die mit einem Laser-Scanning-Vibrometer gemessen wird. Dieses Normal kann sowohl im Halbfreifeldraum der PTB als auch im schiefwinkligen Hallraum betrieben werden, wobei die Weitergabe der Einheit durch aerodynamische Transfernormale mit Hilfe der Substitutionsmethode erfolgt. Für den Halbfreifeldraum wurde zu diesem Zweck eine 24-kanalige Mikrofon-schwenkeinrichtung aufgebaut. Die Arbeiten werden im Rahmen eines von der PTB initiierten und koordinierten EMRP-Projekts gemeinsam mit Partnerinstituten aus Frankreich, Italien, Schweden und der Türkei durchgeführt.

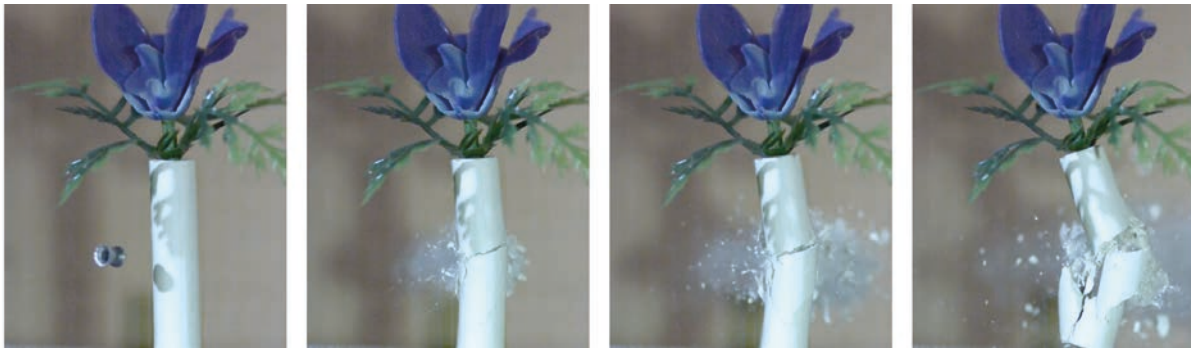
In der Region um Hannover, Braunschweig und Clausthal gibt es zahlreiche Universitätsinstitute und Forschungseinrichtungen wie die DLR und die PTB, die sich mit Akustik und Dynamik in ihren zahlreichen Facetten beschäftigen. 20 Institute haben sich nun zur „Niedersächsischen Arbeitsgemeinschaft Akustik“ zusammengeschlossen. Ziele dieser Kooperation sind unter anderem die Zusammenarbeit in Forschung und Lehre, aber auch eine bessere Sichtbarkeit dieser enormen Kompetenzressourcen nach außen und eine effizientere Nutzung der zahlreichen Versuchseinrichtungen.

Die Einführung des neuen Mess- und Eichrechts mit Beginn des Jahres 2015 prägte in großem Umfang die Arbeit des Fachbereichs 1.3 *Geschwindigkeit* in seinen Tätigkeitsfeldern Geschwindigkeitsmessung im Straßenverkehr und Zubehör für Taxame-



Bild 11: Gruppenfoto der Teilnehmer des 282. PTB-Seminar „Neue Entwicklungen auf dem Gebiet der Verkehrsüberwachungsgeräte“





ter in Kraftfahrzeugen. Im Rahmen der ersten Konformitätsbewertungsverfahren nach neuem Recht mussten viele vor allem formale und juristische Änderungen in die internen Prozesse und die Dokumentation aufgenommen werden.

Auch die Diskussion mit den Eichbehörden der Länder und den betroffenen Herstellern nahm breiten Raum ein.

Ein gutes Forum für die Information der interessierten Kreise und entsprechende Diskussion bot dabei auch das am 29. Oktober 2014 im Hörsaal der PTB durchgeführte 282. PTB-Seminar „Neue Entwicklungen auf dem Gebiet der Verkehrsüberwachungsgeräte“ (Bild 11). Mit Vorträgen von PTB-Experten, Sachverständigen, Eichamtsmitarbeitern, der Polizei und der Justiz wurde hier ein breites Spektrum von Technologie- bis Rechtsfragen in einer Veranstaltung abgedeckt. Die ca. 130 Teilnehmer kamen vorwiegend aus Deutschland, aber auch aus Österreich, der Schweiz und den Niederlanden.

Zur gezielten Information und Unterstützung der Justiz in den technischen Fragen bei Prüfungen nach altem und neuem Mess- und Eichrecht bietet der Fachbereich inzwischen Fortbildungen vor Ort an. Im abgelaufenen Jahr haben insbesondere Gerichte und Staatsanwaltschaften aus Hessen und Niedersachsen von diesem Angebot Gebrauch gemacht.

Die Arbeitsgruppe *Dynamische Druckmessung* konnte zum Abschluss des Jahres nach über 2 Jahren Bauzeit die ersten Versuche in ihrer modernisierten Raumschießanlage durchführen. Nach langer Wartezeit mit sehr eingeschränkten Mess- und Prüfmöglichkeiten stehen damit nun Anlagen zur Verfügung, die alle Anforderungen an die Arbeitssicherheit erfüllen und auch technisch auf dem neuesten Stand sind.

Trotz der eingeschränkten Möglichkeiten in jüngster Vergangenheit konnte die Arbeitsgruppe das anstehende Renotifizierungsverfahren als benannte

Bild 12: Bildsequenz einer Hochgeschwindigkeitskamera zum Einschlagverhalten von Projektilen auf typische Schießbudenziele, hier ein Diabolo

Prüfstelle nach Maschinenrichtlinie erfolgreich abschließen.

Eine der ersten Untersuchungen, die in den modernisierten Räumlichkeiten durchgeführt wurden, betraf das Rückprallverhalten von 4,4-mm-kupfergemantelten Bleigeschossen, wie sie von Schießbuden gewehren verschossen werden (Bild 12). Die Versuche zeigten, dass bei einer kinetischen Energie unter 2,5 Joule Geschosse häufig das Target nicht zerschlagen können und ohne nennenswerte Deformation direkt zum Schützen zurückgeworfen werden. Ab einer kinetischen Energieabgabe über 3 Joule zerschlagen diese Geschosse das Tonröhrchen und deformieren sich an der innenliegenden Speiche (Bild 13). Hier stellt sich im Sinne der Sicherheit die unerwartete Frage nach der Notwendigkeit zur Vorgabe einer Mindestenergie.



Bild 13: Unterschiedliche Deformationsgrade von typischen Schießbudenprojektilen bei unterschiedlicher Schussenergie (von links nach rechts: 0,6 J; 1 J; 3 J)

# In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

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

## Grundlagen der Metrologie

### Neubestimmung der Masse zweier $^{28}\text{Si}$ -Kugeln für das Avogadro-Projekt

Unter Berücksichtigung der vom BIPM im Rahmen der letzten Vergleichsmessungen mit dem Internationalen Kilogrammprototyp ermittelten Korrekturen für die nationalen Kilogrammprototypen konnte die Masse zweier  $^{28}\text{Si}$ -Kugeln in der PTB mit einer Standardunsicherheit ( $k = 1$ ) von  $7 \mu\text{g}$  bestimmt werden. (M. Borys, FB 1.1, [michael.borys@ptb.de](mailto:michael.borys@ptb.de))

### Bemessung und Bewertung von Lärm durch Luftultraschall

Aufgrund der zunehmenden Belastung unserer alltäglichen Umgebung durch Luftultraschall müssen Verwender, Hersteller und Arbeitsschützer immer öfter diesen Lärm messen und das Risiko für die menschliche Gesundheit bewerten. Es gibt zahlreiche Hinweise, dass vermeintlich nicht-hörbarer Ultraschall negativ auf den Menschen einwirkt, allerdings ist das tatsächliche Wissen noch gering und bestehende Regelungen infolgedessen nicht konsistent. Das EARS-Projekt, finanziert von der EU im Rahmen des EMRP-Forschungsprogramms, brachte verschiedene Forschungsdisziplinen zusammen und kombinierte bildgebende Verfahren mit audiologischen Messungen. Es konnte gezeigt werden, dass Ultraschall tatsächlich gehört werden kann. Hörschwellen für Luftultraschall wurden ermittelt. Diese Hörschwellen können zur Bestimmung von Grenzwerten für die Belastung durch Ultraschalllärm herangezogen werden. (C. Kling, FB 1.6, [christoph.kling@ptb.de](mailto:christoph.kling@ptb.de))

### Heterodyn-Streifenzählung – ein neues Primärkalibrierungsverfahren für tieffrequente Schwingungen

Mithilfe eines neuen Mess- und Auswerteverfahrens wurde es möglich, den messtechnischen Aufwand für die Primärkalibrierung mit Heterodyn-Laser-Interferometern für die Anwendung bei tiefen Schwingfrequenzen drastisch zu reduzieren, ohne Kompromisse bei der Messunsicherheit einzugehen. (T. Bruns, FB 1. 7, [thomas.bruns@ptb.de](mailto:thomas.bruns@ptb.de))

### Vergleich von Hilbert-Transformations- und Sinus-Fit-Ansätzen für die Bestimmung von Dämpfungsparametern

Für die Analyse von rotatorischen Dämpfungsmessungen im Zeitbereich wurden zwei unterschiedliche Auswertungsansätze verglichen. Der erste untersuchte Ansatz beinhaltet die Berechnung der Hilbert-Transformierten der Messdaten, was eine Dämpfungsbestimmung mittels linearer Regression ermöglicht. Der zweite Ansatz umfasst eine direkte nichtlineare Approximation einer gedämpften Sinusfunktion an die Messdaten. Beide Ansätze wurden in Form von simulierten Daten und Messdaten verglichen. (L. Klaus, FB 1. 7, [leonard.klaus@ptb.de](mailto:leonard.klaus@ptb.de))

### Modellparameteridentifikation für Drehmomentaufnehmer basierend auf Messdaten

Die dynamische Kalibrierung von Drehmomentaufnehmern erfordert die Modellierung der Messeinrichtung und des Aufnehmers. Die dynamischen Eigenschaften des Aufnehmers werden durch die Modellparameter, die anhand von Messdaten identifiziert werden sollen, beschrieben. Verschiedene Schätzverfahren für die Identifikation der Modellparameter und die Implementierung der Parameteridentifikation werden vorgestellt und an einem Beispiel illustriert. (L. Klaus, FB 1. 7, [leonard.klaus@ptb.de](mailto:leonard.klaus@ptb.de))

## Metrologie für die Wirtschaft

### Erster Feldeinsatz des Wind-Lidar-Systems der PTB

Das von der PTB neu entwickelte Lidar-System erlaubt die präzise Bestimmung des Windvektors in Höhen von 5 m bis über 200 m. Im Gegensatz zu konventionellen Wind-Lidar-Systemen, welche hierfür nahezu homogene Strömungsfelder voraussetzen, kann das von der PTB entwickelte Wind-Lidar auch in komplexen Geländestrukturen eingesetzt werden. Bei einem ersten Feldeinsatz wurden Vergleichsmessungen zwischen dem Lidar-System der PTB und einem kalibrierten Schalensternanemometer in 100 m Höhe durchgeführt. Obwohl die Strömung durch Nachlaufwirbel einer Windkraftanlage gestört war, wurden Abweichungen im Bereich von lediglich 1 % festgestellt. (M. Eggert, FB 1.4, [michael.eggert@ptb.de](mailto:michael.eggert@ptb.de))

### **Verbundvorhaben „Monitoring des Biomethanaufbereitungsprozesses“ (MONA) abgeschlossen**

Im Rahmen des Verbundvorhabens „Monitoring des Biomethanaufbereitungsprozesses“ (MONA) wurde eine mobile Messeinheit für die Durchfluss- und Methankonzentrationsbestimmung des Abgasstroms von Biogasaufbereitungsanlagen konzipiert, gebaut und erfolgreich für Messreihen an acht Aufbereitungsanlagen eingesetzt. (H.-B. Böckler, FB 1.4, hans-benjamin.boeckler@ptb.de)

### **Kalibrierung von Brücken-, Ladungs- und Spannungsverstärkern für dynamische Anwendungen**

Messverstärker werden zur Aufbereitung von Sensordaten in vielen dynamischen Anwendungen eingesetzt. Ein rückführbares Messergebnis erfordert die Kalibrierung der gesamten Messkette, was die Messverstärker einschließt. Hierzu wurden Methoden zur Kalibrierung der verschiedenen Verstärkertypen mit Kalibrierergebnissen und typischen Messunsicherheitsbeiträgen vorgestellt. (L. Klaus, FB 1.7, leonard.klaus@ptb.de)

### **1-MN-Kraft-Normalmesseinrichtung als Mehrkomponentenmesseinrichtung für Kraft und Drehmoment**

Die Anzahl von Messsystemen steigt, welche mehr als eine Komponente der vektoriellen physikalischen Größen Kraft oder Drehmoment erfassen können. Es gibt daher einen hohen Bedarf für Rückführungen im Bereich der Mehrkomponenten Kraft- und Drehmomentmesstechnik. Mit einer Zusatzeinrichtung für Drehmomenterzeugung ist es möglich, zusätzlich zur dargestellten Kraft im Messbereich von 20 kN bis 1 MN ein präzises Drehmoment im Bereich von 20 N · m bis 2 kN · m zu generieren. Die Messeinrichtung ist Teil der 1-MN-Kraft-Normalmesseinrichtung (1-MN-K-NME). Somit können Messsysteme untersucht und charakterisiert werden, welche kombinierte Belastungen von Axialkräften  $F_z$  und Drehmomenten  $M_z$  erfordern, z. B. Reibwertmessköpfe aus der Schraubenindustrie oder Radlastsensoren. (S. Baumgarten, FB 1.2, sebastian.baumgarten@ptb.de)

### **Metrologie für die Gesellschaft**

#### **Erfolgreicher Start der Forschungszusammenarbeit PTB – Hamburg Wasser zur Untersuchung des messtechnischen Verhaltens von Wasserzählern in kommunalen Versorgungsnetzen**

Im Rahmen eines insgesamt dreijährigen Forschungsvorhabens wollen die PTB und die Hamburger Wasserwerke GmbH Parameter zur Bewertung und Optimierung der Standzeiten von Wasserzäh-

lern in kommunalen Versorgungsnetzen erarbeiten. Gestartet wurde das Vorhaben 2014 mit einem Großversuch, bei dem ca. 7500 Kalt- und Warmwasserzähler unterschiedlicher Größe und Bauart nach Ablauf der regulären Eichfrist aus dem Hamburger Versorgungsnetz ausgebaut und messtechnisch untersucht wurden. Die Ergebnisse belegen eindeutig die Notwendigkeit, die aktuellen Vorschriften – beispielsweise bezüglich des derzeit praktizierten Stichprobenverfahrens zur Verlängerung der Eichfrist – grundsätzlich zu überprüfen. Gleichzeitig bilden sie die Grundlage dafür, das weitere Untersuchungsprogramm zu optimieren, gezielt auf andere Versorgungsgebiete und damit Wasserqualitäten auszuweiten und so in einem überschaubaren Zeitrahmen verallgemeinerungswürdige Aussagen über mögliche Verlängerungen der Nutzungsdauer von Wasserzählern zu erreichen. (G. Wendt, FB 1.5, gundrun.wendt@ptb.de)

#### **Thermochrome Folien zur einfachen, Magnetresonanztomografie(MRT)-kompatiblen Erfassung von Ultraschall-induzierter Erwärmung**

Mit einem einfach anwendbaren, an der PTB umgesetzten Verfahren kann die Erwärmung durch therapeutischen Ultraschall in einer Ebene in Gewebephantomen gemessen werden. Durch die Kompatibilität des Aufbaus zu Magnetresonanztomografen (MRT) können damit MRT-Temperaturmessungen unabhängig validiert werden. Weiterhin kann der Aufbau zur unkomplizierten Konstanzprüfung von therapeutischen Ultraschallgeräten und zur Überprüfung von Berechnungsalgorithmen benutzt werden. (J. Haller, FB 1.6, julian.haller@ptb.de, V. Wilkens, FB 1.6, volker.wilkens@ptb.de)

#### **Kann man Infrasschall und Ultraschall hören?**

Zahlreiche Geräuschquellen an Arbeitsplätzen, in der Öffentlichkeit, in Häusern und Wohnungen emittieren Schall nicht nur innerhalb des sogenannten „Hörfrequenzbereichs“ von ca. 16 Hz bis 16 kHz sondern auch darunter (Infrasschall) und darüber (Ultraschall). Die Angabe dieses „Hörfrequenzbereichs“ mit den genannten Grenzen hat sich eingebürgert, ist aber irreführend, denn der Mensch kann Töne und Geräusche auch in den angrenzenden Frequenzbereichen noch wahrnehmen. Diese Wahrnehmung wird oft als störend empfunden, allerdings ist wenig darüber bekannt, welche grundlegenden Mechanismen dabei eine Rolle spielen. Dieses Unkenntnis ist auch der Grund dafür, dass insbesondere für den Ultraschall in Luft kaum Vorschriften und Normen für Anforderungen an Messgeräte, Messmethoden und Obergrenzen existieren. Aber auch im Infrasschallbereich gibt es keine anerkannten

Obergrenzen, und die Messvorschriften werden immer wieder kontrovers diskutiert. (C. Koch, FB 1.6, christian.koch@ptb.de)

### **Aussagekraft der Ergebnisse des EARS-Projekts für Windkraftanlagen**

Im täglichen Leben und an Arbeitsplätzen geben viele Schallquellen neben hörbarem Schall auch Töne ab, die nach herkömmlicher Auffassung unhörbar sind, den sogenannten Infraschall. Auch Anlagen und Einrichtungen für erneuerbare Energiequellen, die für eine zukunftsfähige Energieversorgung unabdingbar sind, sind potenzielle Quellen von Infraschall. Das betrifft auch Windkraftanlagen, deren Rotorblätter unter anderem Infraschall erzeugen können. Um einschätzen zu können, welchen Einfluss Infraschall auf den menschlichen Organismus hat, ist es notwendig, die Mechanismen der Wahrnehmung genauer zu untersuchen. Deshalb wurden im EARS-Projekt physiologische und psychoakustische Messmethoden zur Untersuchung miteinander kombiniert. (C. Koch, FB 1.6, christian.koch@ptb.de)

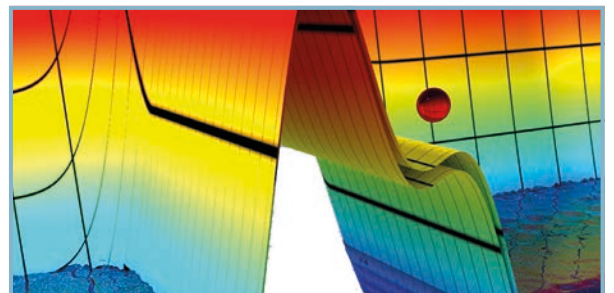
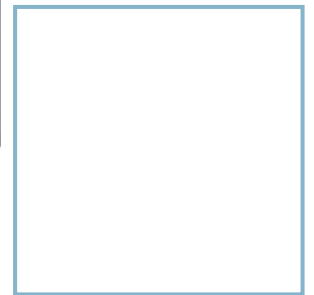
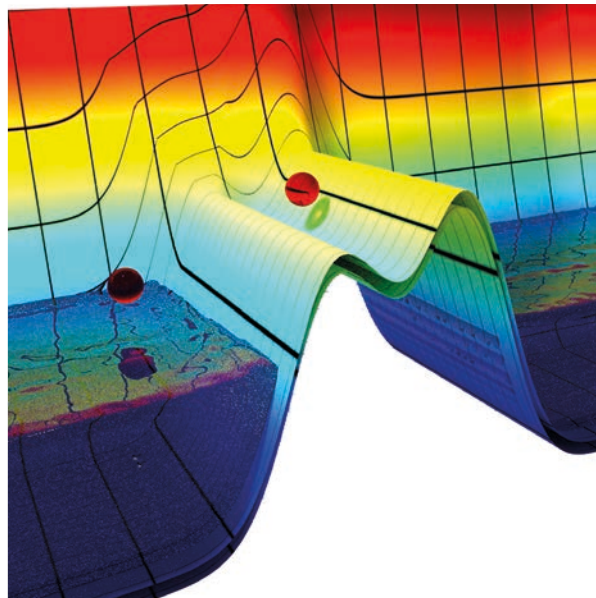
### **Messverfahren für Gehgeräusche von Bodenbelägen durch Ringversuch bestätigt**

Im Jahr 2013 wurde ein von der PTB entwickeltes Messverfahren zur Beurteilung des Geräuschverhaltens von Fußbodenbelägen als EN 16205 veröffentlicht. Im Jahr 2014 wurde es von 17 europäischen Laboratorien anhand von Laminat-, PVC- und Teppichproben auf seine Tauglichkeit geprüft. Ergebnis: Das Verfahren liefert sichere und wahrnehmungsgemäße Ergebnisse. Lediglich bei Teppichen kann es zu Problemen kommen, da sie häufig weniger Schall abstrahlen als die zur Anregung zu verwendeten Trittschall-Hammerwerke (W. Scholl, FB 1.7, werner.scholl@ptb.de)



# Abteilung 2

## Elektrizität



Die Abteilung *Elektrizität* bearbeitet alle Aspekte des Themenbereichs *Elektrizität und Magnetismus* und sorgt damit für Verlässlichkeit und Fortschritt des elektrischen Messwesens. Die Arbeiten umfassen die Untersuchung metrologisch relevanter Prozesse in Festkörper-Nanoschaltungen, die Entwicklung von elektrischen Quanten-, Primär- und Transfornormalen sowie Kalibrier- und Prüfdienstleistungen. Durch Beratungsaktivitäten, die Mitarbeit in Normungs- und sonstigen Gremien sowie durch Technologietransfer unterstützt die Abteilung die deutsche Wirtschaft und trägt zur Einheitlichkeit des Messwesens bei.

Organisatorisch ist die Abteilung in die sechs Fachbereiche *Gleichstrom und Niederfrequenz*, *Hochfrequenz und Felder*, *Elektrische Energiemesstechnik*, *Quantenelektronik*, *Halbleiterphysik und Magnetismus* sowie *Elektrische Quantenmetrologie* gegliedert. 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 üblichem Umfang erbracht. Der überwiegende Teil der Kalibrierungen kann mit Verweis auf das „Mutual Recognition Arrangement“ der Meterkonvention (CIPM MRA) angeboten werden. Dadurch wird die internationale Anerkennung der Kalibrierungen gewährleistet. Zur Förderung des Dialogs mit den Kunden, insbesondere den akkreditierten Kalibrierlaboratorien, wurde auch im Jahr 2015 ein PTB Seminar angeboten. In dem Seminar wurden Neuerungen auf dem Gebiet der elektrischen Messtechnik und der Kalibrierung elektrischer Größen vorgestellt. Die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter der Abteilung arbeiten eng mit den Fachausschüssen des deutschen Kalibrierdienstes (DKD) zusammen und unterstützen DKD-Ringvergleiche.

Die Forschungsarbeiten der Abteilung werden in vielen Fällen in enger Kooperation mit anderen na-

Titelbild:

Funktionsprinzip einer Halbleiter-Einzelelektronen-Stromquelle: Einzelne Elektronen, dargestellt als rote Kugeln, werden von einem „dynamischen Quantentopf“ (zwischen den „Hügeln“ der dargestellten Potentiallandschaft) von der einen Seite eines Leiters kommend eingefangen (Bild 1) und zur anderen Seite hin ausgeworfen (Bild 2).

tionalen metrologischen Instituten durchgeführt. Hierzu beteiligt sich die Abteilung an dem von der EU geförderten European Metrology Research Programme (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 Förderlinien „SI Broader Scope I“ und „New Technologies“ erfolgreich abgeschlossen worden. Die Abteilung hat in beiden Förderlinien je ein Projekt koordiniert. In „SI Broader Scope I“ wurde, koordiniert durch die Abteilung, das Projekt „Quantum Ampere“ abgeschlossen, in dem Quantentechnologien zur Rückführung der Stromstärke auf die Elementarladung entwickelt wurden. In „New Technologies“ wurde das Projekt „THz Security“ erfolgreich beendet. In diesem Projekt hat die PTB zusammen mit fünf anderen nationalen Metrologieinstituten und weiteren Partnern aus der Industrie und Universitäten Rückführungsverfahren für Messgrößen im THz-Frequenzbereich für Anwendungen in der Sicherheitstechnik erarbeitet.

In der neuen EMPIR-Förderlinie „Capacity Building“ unterstützt die Abteilung sich entwickelnde nationale Metrologieinstitute in Europa bei der Nutzung von Wechselladungs-Quantennormalen. Die Auftaktveranstaltung des entsprechenden Projektes fand in der PTB statt und wurde durch praktische Trainingsangebote ergänzt.

Im Bereich der Nachwuchsförderung kooperiert die Abteilung intensiv mit der Technischen Universität Braunschweig (TU BS). Im Berichtszeitraum ist das von der TU BS und der PTB eingeworbene DFG-Graduiertenkolleg „Metrology for Complex Nanosystems“ (Nanomet) erfolgreich angelaufen. Die Abteilung Elektrizität ist eine von vier an Nanomet beteiligten Fachabteilungen der PTB.

Nach diesem allgemeinen Überblick werden im Folgenden die im Jahr 2015 erzielten Fortschritte in den fünf Schwerpunktgebieten dargestellt.

### Grundlagen der elektrischen Metrologie

Zur Darstellung der Basiseinheit Ampere gemäß der geplanten neuen SI-Definition arbeitet die Abteilung intensiv an sogenannten selbstreferenzierten Quantenstromquellen. Diese Quantenschaltungen bestehen aus in Serie geschalteten Halbleiter-Einzelelektronen-Stromquellen (vgl. Titelseite des Abteilungsberichts) und metallischen Einzelelektronen-Detektoren. Die Detektoren messen Fehlereignisse. Werden diese bei

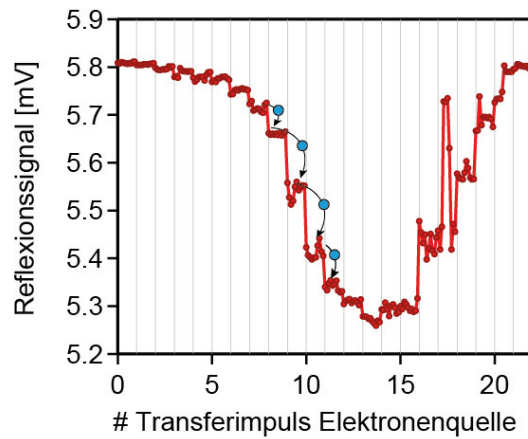
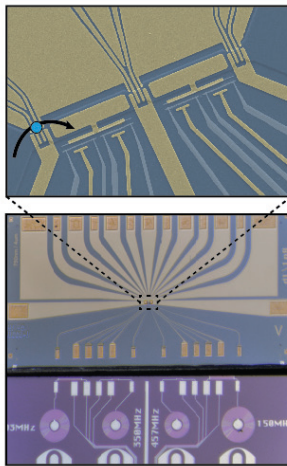


Bild 1: Links: Serienschaltung aus drei Halbleiter-Einzelektronen-Stromquellen, vier Einzelektronen-Detektoren und vier Resonatoren auf einem separaten Chip. Rechts: Demonstration der Einzelektronen-Detektion. Das Reflexionssignal zeigt Stufen, die einzelnen Elektronen entsprechen.

der Bestimmung des Stroms berücksichtigt, kann mit der Serienschaltung eine kleinere Unsicherheit erreicht werden als mit einer einzelnen Einzelektronen-Stromquelle. Ziel der Arbeiten ist die Erzeugung eines quantisierten Stromes im Bereich 100 pA mit einer Unsicherheit von  $10^{-7}$  oder besser. Dazu werden breitbandige Einzelektronen-Detektoren (RF-SET-Detektoren) verwendet (siehe Bild 1). Die Fertigung von integrierten Schaltungen mit etwa zehn Elementen stellt hohe Anforderungen an die Reproduzierbarkeit der Herstellungsverfahren. Daher wurde ein neues Herstellungsverfahren für RF-SETs entwickelt, das nicht auf kritische Plasmaätzschritte und Germanium-Masken zurückgreift (s. Bild 2).

elektrischer Gleichströme auf überragendem Präzisionsniveau erlaubt. Zentrales Element für die Kalibrierung des Verstärkers bildet ein ebenfalls in der PTB neu entwickelter, binär aufgebauter Kryostromkomparator (Cryogenic Current Comparator, CCC, siehe Bild 3). Dieser ermöglicht die Kalibrierung des Verstärkers mit einer relativen Unsicherheit von weniger als einem Teil in  $10^7$ . Mit einem derart kalibrierten Verstärker wurde nachgewiesen, dass der Strom (Stromstärke etwa 100 pA) einer

Um mit einer selbstreferenzierten Quantenstromquelle eine Unsicherheit von  $10^{-7}$  zu erreichen, sollte die Unsicherheit jeder einzelnen Halbleiter-Einzelektronen-Stromquelle im Bereich  $10^{-6}$  liegen. Zur Überprüfung dieser Anforderung wurde in einer Zusammenarbeit der Abteilungen 7 und 2 der PTB ein neuartiger Transimpedanzverstärker entwickelt, der die rückführbare Messung kleiner

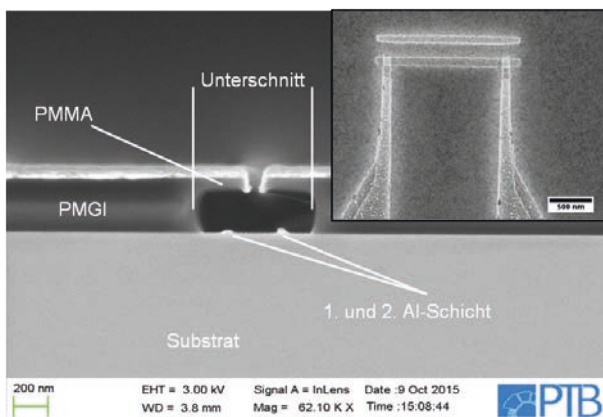


Bild 2: Rasterelektronen-Mikroskopie-Aufnahme des Querschnitts des neuen Schichtsystems zur Herstellung von Einzelektronen-Detektoren. Das eingefügte Bild zeigt einen mit der neuen Technologie hergestellten Einzelektronen-Detektor.



Bild 3: 14-bit-CCC-System für die Kalibrierung hochpräziser Stromverstärker



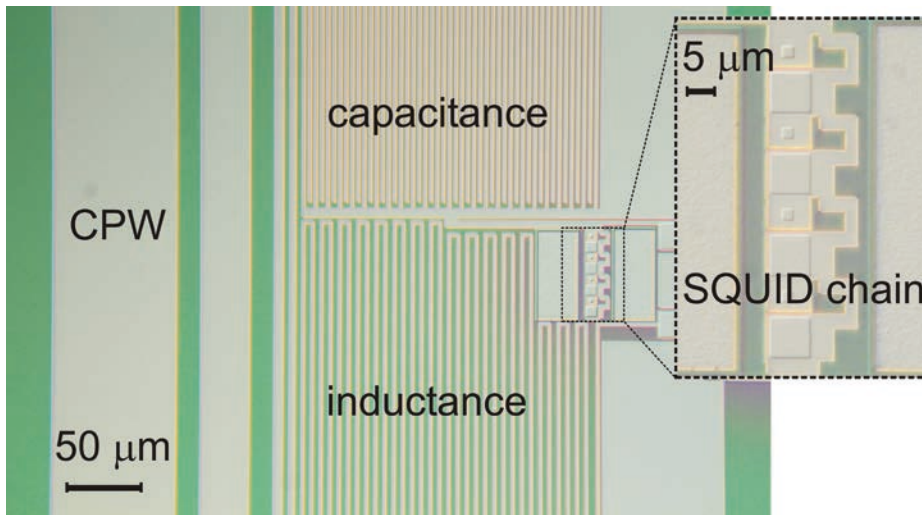


Bild 4: Mikrowellenresonator bestehend aus einer mäanderförmigen Induktivität und einer Fingerstruktur-Kapazität, gekoppelt an einen koplanaren Wellenleiter. Vergrößerung: SQUIDs, die in Serie zur Schwingkreisinduktivität geschaltet sind.

Halbleiter-Einzelelektronen-Stromquelle innerhalb der relativen Messunsicherheit von nur zwei Teilen in  $10^7$  mit dem erwarteten Wert übereinstimmt. Die Halbleiter-Einzelelektronen-Stromquellen der PTB haben also die erforderlichen Eigenschaften. Die Messunsicherheit von nur zwei Teilen in  $10^7$  ist um etwa einen Faktor fünf geringer als bei zuvor publizierten Validierungsmessungen und damit erstmals besser als die bestmögliche Ampere-Realisierung im zurzeit gültigen internationalen Einheitensystem.

Die Untersuchung von Quantenschaltungen erfordert hochempfindliche Detektionssysteme. Daher werden nichtlineare Mikrowellen-Resonatorschaltungen untersucht, die mithilfe von Bifurkationseffekten die Detektion von sehr schwachen elektrischen Signalen ermöglichen. Im Berichtsjahr wurden supraleitende Mikrowellenresonatoren mit eingebetteten SQUIDs (Superconducting Quantum Interference Devices) entwickelt (siehe Bild 4). Durch Anregung des Resonators bei der zweifachen Resonanzfrequenz konnte der Perioden-Verdopplungs-Bifurkationseffekt beobachtet werden. Die Schaltung kann als hochempfindlicher Schwellenwertdetektor betrieben werden.

### Aufbau von Quanten- und klassischen Einheitenskalen

Die Skalenbereiche, über die die elektrischen Einheiten dargestellt und weitergegeben werden können, werden beständig ausgebaut, um dem Bedarf der Industrie Rechnung zu tragen. Dabei sollen vermehrt Quantennormale eingesetzt werden, da dies die Kalibrierketten verkürzt, sodass die Kalibrierung elektrischer Messgeräte kostengünstiger erfolgen kann.

Josephson-Spannungsnormale bilden die Basis für die Kalibrierung von Spannungsmessgeräten und

Spannungsquellen. Sie finden auch Verwendung zur Messung von Spannungsverhältnissen in Impedanzmessbrücken. Zur Messung des Verhältnisses zweier Impedanzen desselben Typs, z. B. zweier Kapazitäten, werden zurzeit programmierbare binäre Josephson-Spannungsnormale verwendet. Derartige Josephson-Spannungsnormale mit Amplituden bis zu 10 V können routinemäßig im Reinraumzentrum der PTB mit  $Nb/Nb_xSi_{1-x}/Nb$ -Technologie hergestellt werden. Im Berichtsjahr fand erstmals ein Vergleich von Impedanzmessbrücken mit binären Josephson-Spannungsnormalen im Rahmen eines EMRP-Projektes statt. Teilnehmer waren das schwedische Metrologieinstitut SP und die PTB. Am Beispiel der Messung von Kapazitätsverhältnissen konnte eine Übereinstimmung der Josephson-Impedanzmessbrücken auf dem Niveau von  $10^{-8}$  demonstriert werden.

Binäre Josephson-Spannungsnormale erzeugen zwar hohe Amplituden, haben jedoch ein komplexes Spektrum, und ihre fundamentale Frequenz ist auf den kHz-Bereich beschränkt. Daher wird die Entwicklung von pulsgetriebenen Josephson-Spannungsnormalen intensiv vorangetrieben. Pulsgetriebene Josephson-Normale können Spannungen mit beliebigem Spektrum, insbesondere mit einem reinen Sinusspektrum, und mit fundamentalen Frequenzen bis in den MHz-Bereich erzeugen. Bisher war jedoch ihre Amplitude auf wenige 100 mV beschränkt. Im Berichtsjahr ist es gelungen, 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 zu erhöhen (siehe die Rubrik „Nachrichten des Jahres“).



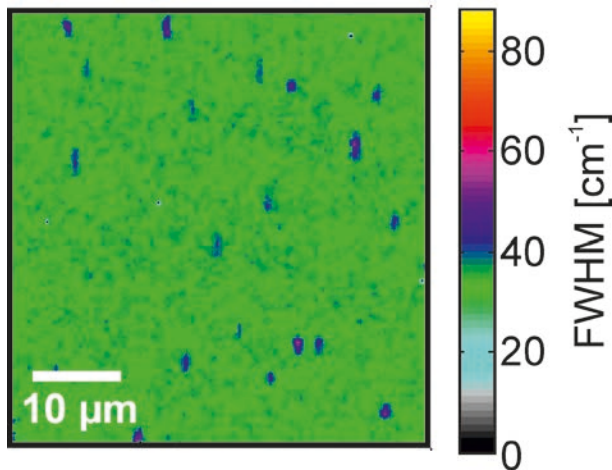


Bild 5: Raman-Mikroskopie-Aufnahme von in der PTB epitaktisch auf SiC gewachsenem Graphen. Ein hoher Anteil an Monolagen-Graphen (grün) mit nur wenigen vereinzelt, elektrisch nicht verbundenen Doppellagen (blau) ist erkennbar

Mit pulsgetriebenen Josephson-Spannungsnormalen lassen sich automatisierbare Quadraturbrücken aufbauen, mit denen eine Kapazität auf einen Wechselstrom-Widerstand zurückgeführt werden kann. Im Berichtsjahr wurde ein Prototyp einer solchen Brücke entwickelt. Ziel der Arbeiten ist es, die Kapazität basierend auf dem Wechselstrom-Quanten-Hall-Effekt und einer Josephson-Quadraturbrücke darzustellen und weiterzugeben.

Zur Vereinfachung der Quanten-Hall-Metrologie bietet Graphen (eine kristalline Schicht aus einer oder wenigen Lagen von Kohlenstoffatomen) großes Potenzial. Bei der reproduzierbaren Herstellung monolageriger Graphen-Schichten aus SiC konnte eine weitere Verbesserung erzielt werden. Es wurde demonstriert, dass mithilfe einer Substratvorbehandlung (Benetzung mit einem Polymer und thermischem Ausheizen) glatte, homogene Graphen-Schichten hergestellt werden können, die fast vollständig aus monolagerigem Graphen bestehen (siehe Bild 5). Das Verfahren ist zum Patent angemeldet.

Auf dem Gebiet der klassischen Wechselstrommesstechnik wurde das Angebot für die Kalibrierung von Brückennormalen um eine kostengünstige Substitutionsmethode erweitert. Brückennormale werden zur Kalibrierung von Messsystemen für dynamische mechanische Größen verwendet, in denen z. B. Dehnungsmessstreifen als mechanische Sensoren dienen. Die neue Dienstleistung ermöglicht die Abdeckung eines größeren Parameterbereiches mit deutlich erhöhter Anzahl von Kalibrierpunkten bei nur geringfügig erhöhter Messunsicherheit.

Auf dem Gebiet der klassischen Gleichstrommesstechnik wünschen die Kunden zunehmend geringere Messunsicherheiten bei der Kalibrierung von Strommesswiderständen mit beliebigen Nennwerten. Um die bisherige Beschränkung durch die Kurzzeitstabilität der verwendeten Stromquellen zu umgehen, wird ein neues Messverfahren realisiert, mit dem Unsicherheiten unter  $10^{-6}$  erreicht werden sollen (siehe Bild 6). Erste Untersuchungen an einem  $1\text{-}\Omega$ -( $1\text{-}W$ )-Strommesswiderstand zeigen, dass sich die Streuung der Messwerte um mehr als einen Faktor 10 verringern lässt.

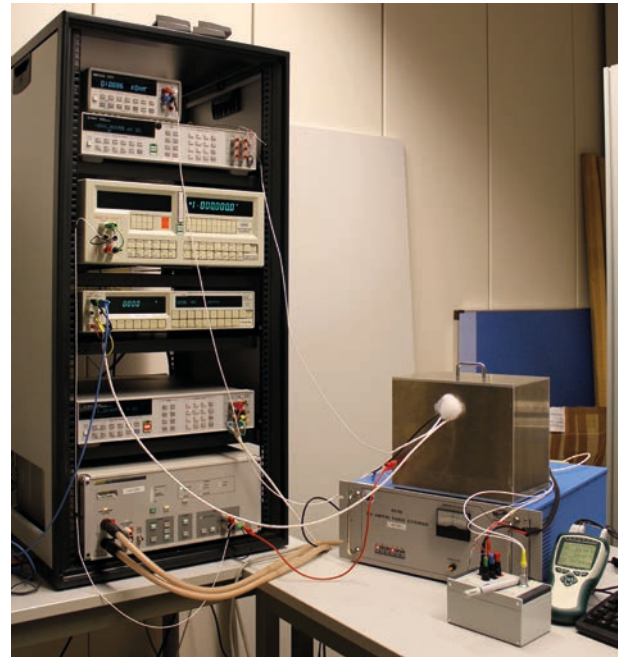


Bild 6: Messaufbau zur Untersuchung und Kalibrierung von Strommesswiderständen.

## Elektrische Energiemesstechnik

Im Gebiet der elektrischen Energiemesstechnik werden die messtechnischen Dienstleistungen entwickelt und bereitgestellt, die für eine verlässliche und nachhaltige Versorgung mit elektrischer Energie erforderlich sind. Dabei greift die Abteilung die metrologischen Themen auf, die sich aus der aktuellen Entwicklung des Energieversorgungssystems ergeben.

Im Rahmen der Gesetzesinitiative zur Digitalisierung der Energiewende werden intelligente Messsysteme eingeführt, deren Herzstück ein Smart-Meter-Gateway ist. Die Gateways verarbeiten eichrechtlich relevante Messdaten aus Elektrizitätszählern und verfügen über geeignete digitale Schnittstellen, um die Messdaten auf internetfähige Endgeräte der Verbraucher zu übertragen. Hierfür bedarf es einer eichrechtlich vertrauenswürdigen, effizienten



Bild 7: Messsystem für hohe Wechselspannungen bis 800 kV

und vereinheitlichten Übertragungstechnologie. Die PTB unterstützt dazu entsprechende Standardisierungsaktivitäten der Industrie, insbesondere die Spezifikation geeigneter Datenformate.

Weiterhin wurde ein Verfahren zur rückgeführten Bestimmung der Latenzzeiten eines modernen elektronischen Elektrizitätszählers mit integriertem

Kommunikationsadapter entwickelt. Erfasst wird sowohl die Latenzzeit der digitalen Kommunikation mit einem Smart-Meter-Gateway als auch die Latenzzeit, die bei der Messung der analogen Eingangsgrößen am Zähler zusätzlich auftritt.

Im Gebiet der elektrischen Leistungsmesstechnik wurde ein Normal für die breitbandige Leistungsmessung bis zu Frequenzen von 20 kHz aufgebaut. Der Frequenzbereich des Normals soll auf 150 kHz erweitert werden, da die Einbindung regenerativer Energiequellen ins elektrische Netz und die Verwendung nichtlinearer Verbraucher zu Spektralanteilen in diesem Frequenzbereich führt.

Auch die Hochspannungsmesstechnik und die Messwandlermesstechnik werden beständig weiterentwickelt. In diesem Rahmen wurde ein neues Präzisionsmesssystem für hohe Wechselspannungen bis 800 kV und Frequenzen von 10 Hz bis 400 Hz entwickelt und aufgebaut (siehe Bild 7). Das System basiert auf der Erfassung des Ladestroms von Hochspannungs-Druckgaskondensatoren und der Konvertierung dieses Stromes in ein digitales Spannungssignal. Weiterhin wurde die Bürdenmesseinrichtung vollständig modernisiert, die zur Prüfung und Kalibrierung von Normalbürden für Messwandler eingesetzt wird.

## 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 Typen von Wellenleitern.

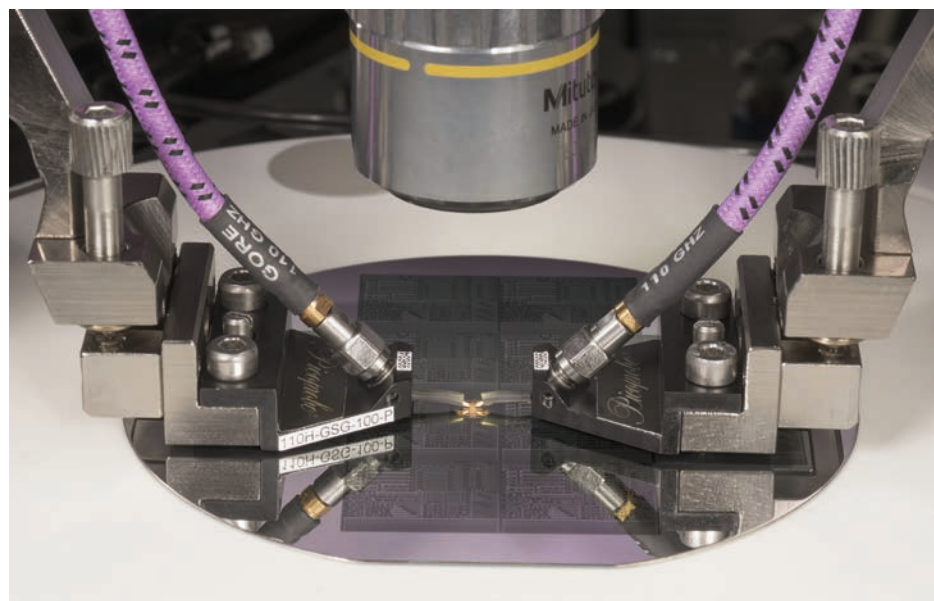


Bild 8: Messaufbau für On-Wafer-Streuparametermessungen mit rein elektronischen Verfahren



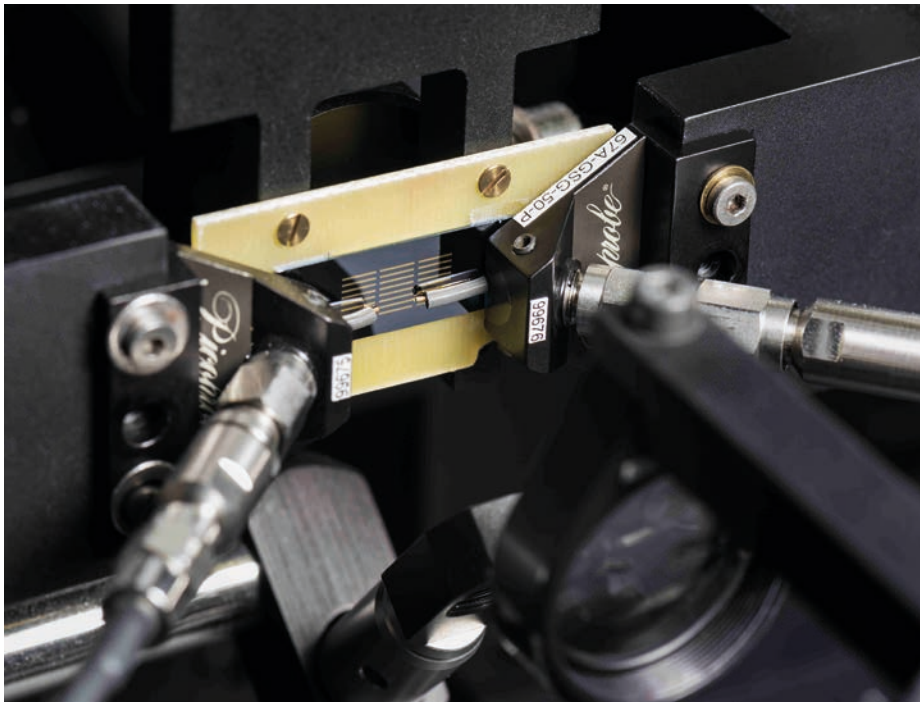


Bild 9: Messaufbau für On-Wafer-Streuparametermessungen mit optoelektronischen Verfahren

Im Berichtsjahr wurde zur Rückführung der HF-Leistung ein neuer Hohlleiter-Kalorimetertyp für Frequenzen bis 110 GHz entwickelt. Aufbauend auf dieser Entwicklung soll Rückführung für die HF-Leistungsmessung bis 170 GHz geschaffen werden. Die Arbeiten zur Rückführung von Streuparametermessungen in koaxialen Wellenleitern für Frequenzen bis 67 GHz (1,85-mm-System) wurden erfolgreich abgeschlossen. In einem nächsten Schritt sollen Streuparametermessungen in koaxialen Wellenleitern für Frequenzen bis 110 GHz (1,0-mm-System) rückgeführt werden.

Bedingt durch die zunehmende Arbeitsgeschwindigkeit integrierter Schaltungen werden zuverlässige Charakterisierungsmethoden für planare HF-Schaltungen benötigt. Dazu werden in der Regel On-Wafer-Streuparametermessungen durchgeführt (siehe Bild 8), deren Messunsicherheiten bisher weitgehend unbekannt sind. Daher wurde im Rahmen von EMPIR ein Forschungsprojekt zur planaren Streuparameter-Messtechnik begonnen. Ziel des Projekts ist die Entwicklung von Kalibriermitteln und -verfahren zur verlässlichen Messung von Streuparametern planarer Wellenleiter bis mindestens 325 GHz. Das Projekt wird von der Abteilung *Elektrizität* der PTB koordiniert. An dem Projekt sind neben europäischen Metrologieinstituten europäische Universitäten und Forschungsinstitute sowie Messgerätehersteller und industrielle Anwender beteiligt.

Auch die Vor-Ort-Messung der Feldstärkeverteilung im freien Raum gewinnt zunehmende Bedeutung. Dafür entwickelt die Abteilung neue Messsysteme

auf der Basis von Oktokoptern (unmanned aerial vehicle – UAV). Die Technik wird für Messungen an Instrumentenlandesystemen auf Verkehrsflughäfen sowie für Untersuchungen zur Wechselwirkung von Windenergieanlagen mit terrestrischen Navigationsanlagen wie UKW-Drehfunkfeuern und Radaranlagen eingesetzt.

Optoelektronische Techniken basierend auf Femtosekundenlasern erlauben extrem breitbandige Messungen bis in der THz-Bereich. Im Berichtsjahr wurde gezeigt, dass frequenz aufgelöste Streuparametermessungen auch mit laserbasierter Messtechnik möglich sind (siehe Bild 9). Dazu wurde ein laserbasiertes Verfahren zur Trennung von hin- und rücklaufenden Spannungssignalen auf planaren Wellenleitern entwickelt. Mit dieser optoelektronischen Zeitbereichsmesstechnik konnten Streuparametermessungen auf planaren Wellenleitern bis 500 GHz mit einer Schrittweite von 500 MHz demonstriert werden.

### **Metrologie für magnetische Nanostrukturen**

Die Arbeiten im Schwerpunktgebiet Nanomagnetismus haben zum Ziel, rückführbare Messverfahren für die Parameter magnetischer Nanostrukturen zu entwickeln und neue physikalische Effekte hinsichtlich ihrer Nutzbarkeit für die Metrologie zu untersuchen. Die Untersuchung des Magnetisierungszustandes von magnetischen Nanopartikeln, die z. B. in der Medizin Verwendung finden, erfordert Sensoren mit einer hohen räumlichen Auflösung und hoher Empfindlichkeit. Obwohl SQUIDS bereits extrem empfindlich sind, müssen sie für diese Aufgabe

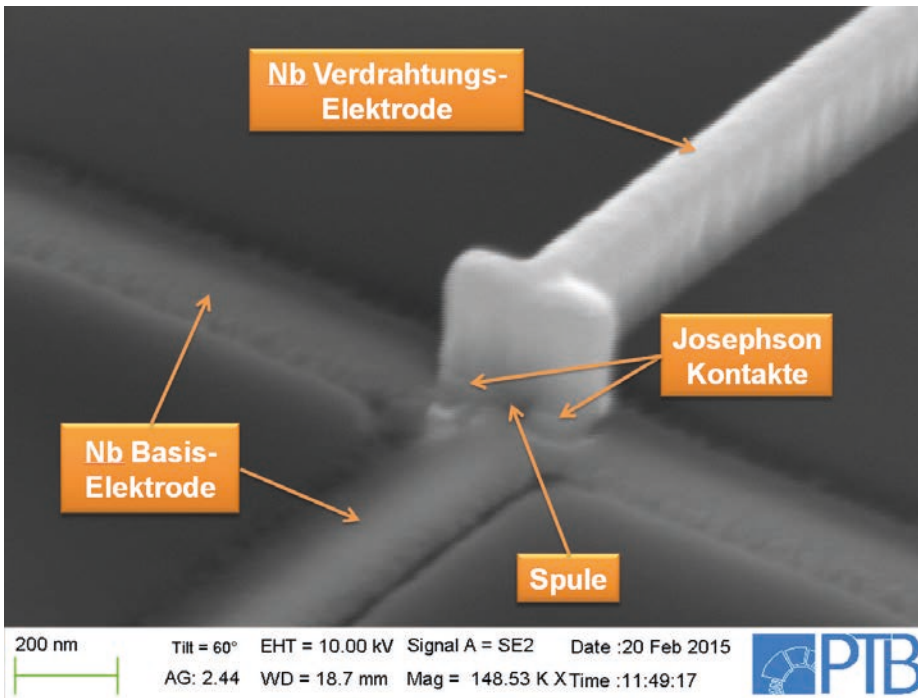


Bild 10: Rasterelektronen-Mikroskopie-Aufnahme eines Nano-SQUID-Sensors

weiter optimiert werden. Dazu wird der komplette SQUID-Sensor verkleinert. Im Berichtsjahr wurden Nano-SQUIDs hergestellt und charakterisiert, deren Josephson-Kontakte nur eine Größe von  $90 \text{ nm} \times 90 \text{ nm}$  besitzen. Die Einkoppelspulen der Nano-SQUIDs haben eine Fläche von lediglich  $0,02 \mu\text{m}^2$  (siehe Bild 10). Es konnte gezeigt werden, dass derartige Nano-SQUIDs in Magnetfeldern bis  $0,25 \text{ T}$  betrieben werden können. Dadurch wird der Anwendungsbereich der Sensoren deutlich erweitert.

nenwand zu messen: Die An- oder Abwesenheit der Domänenwand führt zu einer messbaren Änderung der Thermospannung (siehe Abb. 11). Der Effekt bildet die Grundlage für einen nanoskaligen Temperatursenor. Für diese Anwendung wurde ein Patent erteilt.

Magnetische Domänenwände treten in allen makroskopischen und auch in nanoskaligen magnetischen Materialien und Bauteilen auf. Im Berichtsjahr ist es erstmals gelungen, die thermoelektrischen Eigenschaften einer einzelnen magnetischen Domä-

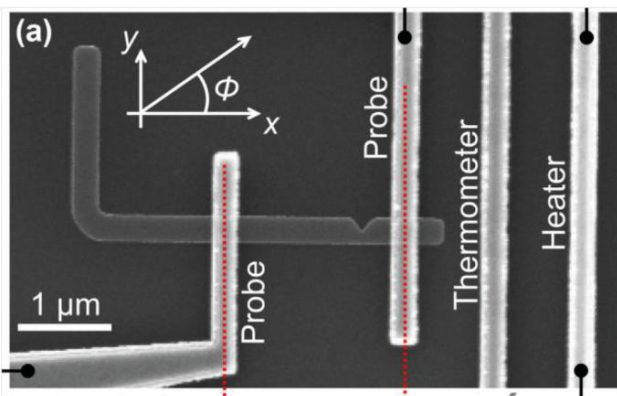


Bild 11: Gebogener magnetischer Nanodraht aus einer Nickel-Eisen-Legierung. Der Heizdraht (rechts) führt zu einem Temperaturunterschied zwischen den elektrischen Kontakten des Nanodrahtes (Probe). Fängt man an der Einkerbung eine magnetische Domänenwand, ändert sich die zwischen den Kontakten gemessene Thermospannung



## In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

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

### Grundlagen der Metrologie

#### Hochpräzises pulsgetriebenes AC-Josephson-Spannungsnormale für Ausgangsspannungen bis 1 V

Die Ausgangsspannung eines pulsgetriebenen AC-Josephson-Spannungsnormals konnte 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. In einem Präzisionsvergleich mit einem AC-Quantenvoltmeter konnte eine exzellente Übereinstimmung von  $(3,5 \pm 11,7)$  nV/V bei einer Frequenz von 250 Hz gezeigt werden. (M. Bieler, FB 2.5, [mark.bieler@ptb.de](mailto:mark.bieler@ptb.de))

#### Perioden-Verdoppelungs-Bifurkationseffekte in Nb-Dünnschicht-Resonatoren mit Josephson-Nichtlinearität

Nichtlineare Mikrowellen-Resonanzschaltungen ermöglichen mithilfe von Bifurkationseffekten die Detektion von sehr schwachen elektrischen Signalen. Es wurden supraleitende Mikrowellenresonatoren mit darin enthaltenen SQUIDs entwickelt und die nichtlinearen Eigenschaften der Josephson-Induktivität  $L_J$  genutzt. Durch Anregung des Resonators bei der zweifachen Resonanzfrequenz konnte der Perioden-Verdoppelungs-Bifurkationseffekt beobachtet werden. (M. Khabipov, FB 2.4, [marat.khabipov@ptb.de](mailto:marat.khabipov@ptb.de))

#### Entwicklung komplexer Photodioden-Carrier für ein optisch angesteuertes pulsgetriebenes Josephson-Spannungsnormale (JAWS-Schaltung)

Komplexe Carrier-Chips für die Flip-Chip-Kontaktierung von schnellen Photodioden wurden entworfen und im Reinraum der PTB hergestellt. Auf einem Carrier-Chip lassen sich acht Photodioden integrieren, um zwei JAWS-Schaltungen mit optisch erzeugten Pulsen zu betreiben. Die Arbeiten wurden im Rahmen des EMRP-Projekts „Q-WAVE“ in enger Kooperation mit den Projektpartnern NPL (Großbritannien) und JV (Norwegen) ausgeführt. Die Carrier-Chips sind inzwischen bei den Projektpartnern im Einsatz. (M. Bieler, FB 2.5, [mark.bieler@ptb.de](mailto:mark.bieler@ptb.de))

#### Erzeugung und Detektion von schwachen Mikrowellensignalen bei 15 mK mit einer kombinierten Josephson-SET-Schaltung

Für den Einsatz bei 15 mK wurde eine kombinierte Mikrowellenschaltung entwickelt, die sowohl eine Josephson-Oszillationsquelle als auch einen SET-Mikrowellendetektor (engl.: *Single Electron Tunneling*) enthält. Beide Schaltungsteile befinden sich auf einem Chip und sind miteinander gekoppelt. Das Ziel ist es, einen Detektor für einzelne Mikrowellenphotonen aufzubauen und zu kalibrieren, der zur Qualitätskontrolle bei der Konzipierung von extrem rauscharmen, kryogenen Messumgebungen von Quantenschaltungen beitragen kann. (S. Lotkhov, FB 2.4, [sergey.lotkhov@ptb.de](mailto:sergey.lotkhov@ptb.de))

#### Nano-SQUIDs mit verbesserter Stabilität gegenüber starken Magnetfeldern von bis zu 0,25 T

Für Untersuchungen von magnetischen Nanopartikeln (MNP) wurden Nano-SQUIDs mit Abmessungen der Josephson-Kontakte von  $90 \text{ nm} \times 90 \text{ nm}$  (Typ A) und  $150 \text{ nm} \times 150 \text{ nm}$  (Typ B) mit einem geringen Kontaktabstand von 100 nm bzw. 60 nm hergestellt und charakterisiert. Es konnte gezeigt werden, dass die Magnetfeldresistenz mit sinkenden geometrischen Abmessungen der Nano-SQUIDs zunimmt, was für die geplanten Untersuchungen sehr vorteilhaft ist. (V. Morosh, FB 2.4, [viacheslav.morosh@ptb.de](mailto:viacheslav.morosh@ptb.de))

#### Herstellung von SETs in integrierten Halbleiterschaltungen

Einzelelektronentransistoren (SETs) sind hochempfindliche Elektrometer, die z. B. in Einzelelektronenschaltungen Verwendung finden. Eine derartige Schaltung ist die selbstreferenzierte Quantenstromquelle der PTB, in der SETs zur Detektion der Fehler von Einzelelektronenpumpen genutzt werden. Für die Integration der SETs mit Halbleiterpumpen war es notwendig, ein neues Herstellungsverfahren zu entwickeln. (D. Reifert, FB 2.4, [david.reifert@ptb.de](mailto:david.reifert@ptb.de))

#### Epitaktisches Graphenwachstum verbessert – Herstellung von elektrischen Quantennormalen aus glatten Graphenschichten

Eine glattere Oberfläche des Substrats verbessert das Wachstum von Graphenfilmen, die zukünftig als Widerstands-Quantennormale genutzt werden sollen. (M. Kruskopf, FB 2.5, [mattias.kruskopf@ptb.de](mailto:mattias.kruskopf@ptb.de))

### **Magneto-Seebeck-Effekt einer magnetischen Domänenwand**

An der PTB gelang die erste Messung der thermoelektrischen Eigenschaften einer einzelnen magnetischen Domänenwand. (P. Krzysteczko, FB 2.5, patrick.krzysteczko@ptb.de)

### **Vektor-Netzwerkanalyse mit Lasern**

Femtosekundenlaser ermöglichen präzise, kostengünstige Hochfrequenzmessungen und könnten zukünftig etablierte elektrische Geräte ersetzen. (M. Bieler, FB 2.5, mark.bieler@ptb.de)

### **Anomale Geschwindigkeit zeitaufgelöst**

Ladungsträger in Festkörpern können sich senkrecht zu einem antreibenden elektrischen Feld bewegen. Diese anomalen Geschwindigkeiten wurden erstmals mit Subpikosekunden-Zeitauflösung detektiert. (M. Bieler, FB 2.5, mark.bieler@ptb.de)

### **Thermisch induzierte Magnetisierungsdynamik**

Theoretische Berechnungen sagen voraus, dass ein Temperaturgradient in magnetischen Tunnelstrukturen zu einem sogenannten thermischen Spin-Transfer-Torque (TSTT) führt. In einem Experiment an der PTB wurde nun erstmals die Änderung der Magnetisierungsdynamik durch einen thermischen Gradienten nachgewiesen. Die gemessenen Änderungen zeigen die für TSTT zu erwartenden Charakteristika. (S. Sievers, FB 2.5, sibylle.sievers@ptb.de)

### **Schneller schalten mit Mikrowellen**

Nanomagnetische Logik-(NML) Schaltungen sind eine vielversprechende Alternative für das Design integrierter Logik-Schaltkreise. Sie versprechen einen niedrigen Energieverbrauch und das dauerhafte Speichern der einmal geschriebenen Information. Bei der NML werden nanoskalige Magnetstrukturen über ihre magnetischen Felder miteinander gekoppelt und so Logikgatter realisiert. An der PTB wurde nun gezeigt, dass mithilfe von Mikrowellen einzelne Eingänge dieser Gatter gezielt adressiert und schnell geschaltet werden können. (S. Sievers, FB 2.5, sibylle.sievers@ptb.de)

### **Detektion einzelner Elektronen in einer integrierten Schaltung aus Halbleitereinzelelektronenquelle und RF-SET**

HF-Reflexionsmessungen an einem supraleitenden Einzelelektronentransistor (SET) ermöglichen eine sensitive Ladungsdetektion einzelner Elektronen, die von einer Einzelelektronenquelle emittiert werden. (N. Ubbelohde, FB 2.5, niels.ubbelohde@ptb.de)

### **Neuartige Silizium-basierte Einzelelektronenpumpen**

Mit Hilfe von einzelnen Dotieratomen in Silizium-basierten Nanostrukturen können neue Typen von Einzelelektronenpumpen realisiert werden. (T. Wenz, FB 2.5, tobias.wenz@ptb.de)

### **Fortschritte bei der rückführbaren Messung und Erzeugung kleiner elektrischer Stromstärken**

Der jüngst in der PTB entwickelte und demnächst kommerziell erhältliche „Ultrastable Low-noise Current Amplifier“ ermöglicht die rückführbare Messung und Erzeugung kleiner elektrischer Gleichströme auf überragendem Präzisionsniveau. (H. Scherer, FB 2.6, hansjoerg.scherer@ptb.de)

### **Weltrekord bei Validierung einer Quantenstromquelle**

Einzelelektronenpumpen sind aussichtsreiche Kandidaten zur Realisierung eines zukünftigen Quantenstromnormals und Gegenstand intensiver metrologischer Forschung. Unter Einsatz eines neuartigen, höchstgenauen Stromverstärkers ist es gelungen, die Quantisierung des von einer Einzelelektronenpumpe gelieferten Stromes in der Größenordnung von 100 pA bislang unerreicht genau nachzuweisen: Innerhalb der relativen Messunsicherheit von nur  $2 \cdot 10^{-7}$  stimmte die Stromstärke mit dem erwarteten quantisierten Wert überein. Diese Messunsicherheit ist um etwa einen Faktor fünf geringer als bei zuvor erzielten Ergebnissen und damit erstmals besser als die bestmögliche Ampere-Realisierung im gültigen SI-Einheitensystem. (H. Scherer, FB 2.6, hansjoerg.scherer@ptb.de)

### **Erster Schritt zur Realisierung einer Impedanzmessbrücke mit pulsgetriebenen Josephson-Schaltungen**

Die hohe spektrale Reinheit pulsgetriebener Josephson-Schaltungen erlaubt eine Vielzahl von Anwendungen. Die Synthese quantengenaue, reiner Sinuswellen soll an der PTB genutzt werden, um eine universelle Impedanzmessbrücke zu realisieren, die in Kombination mit dem Quanten-Hall-Effekt eine quantenbasierte Darstellung der Kapazitätseinheit ermöglicht. (S. Bauer, FB 2.6, stephan.bauer@ptb.de)

### **Mesoskopische Leitfähigkeitsfluktuationen als Ursache von $1/f$ -Rauschen in epitaktischem Graphen**

Graphen, eine einlagige kristalline Schicht von Kohlenstoff-Atomen, ist ein vielversprechendes Material für die Quanten-Hall-Widerstandsmetrologie mit Gleich- und Wechselstrom. Im Hinblick auf

diese Anwendung wurde das  $1/f$ -Rauschen von epiktaktischem Graphen bei tiefen Temperaturen und starken Magnetfeldern untersucht. (C.-C. Kalmbach, FB 2.6, cay-christian.kalmbach@ptb.de)

#### **Vergleich von Josephson-Impedanzmessbrücken zwischen PTB und SP**

Das schwedische Metrologieinstitut SP und die PTB haben ihre neu entwickelten Impedanzmessbrücken, die auf Josephson Schaltungen basieren, miteinander verglichen. (T. Hagen, FB 2.6, thomas.hagen@ptb.de)

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

##### **Erfreuliche Bilanz des 291. PTB-Seminars über die Fortschritte der elektrischen Messtechnik**

Am 29. April 2015 fand das von der Abteilung Elektrizität organisierte 291. PTB-Seminar „Aktuelle Fortschritte von Kalibrierverfahren im Nieder- und Hochfrequenzbereich 2015“ statt. Das Seminar wendet sich an Praktiker auf dem Gebiet der elektrischen Messtechnik und bietet Gelegenheit, sich über aktuelle Entwicklungen zu informieren. Die hohe Teilnehmerzahl von 141 Interessierten belegt den großen Nutzen einer solchen Seminarveranstaltung für die auf dem Gebiet der elektrischen Messtechnik tätigen Praktiker. (J. Melcher, T. Schrader, FB 2.1 u. 2.2, juergen.melcher@ptb.de, thorsten.schrader@ptb.de)

##### **Kostenoptimierte Kalibrierungen von DMS-Brückennormalen**

Das PTB-Angebot für die Kalibrierung von Brückennormalen für Dehnungsmessstreifen (DMS) wurde um eine kostengünstige Substitutionsmethode erweitert. Die neue Dienstleistung ermöglicht die Abdeckung eines größeren Parameterbereiches mit deutlich erhöhter Anzahl von Kalibrierpunkten bei nur geringfügig erhöhter Messunsicherheit. (F. Beug, FB2.1, florian.beug@ptb.de)

##### **Bessere Messunsicherheit für Strommesswiderstände**

Zunehmende Anforderungen von Kunden, Strommesswiderstände mit beliebigen Nennwerten mit einer erweiterten Unsicherheit von weniger als  $1 \cdot 10^{-6}$  zu kalibrieren, scheitern bisher an der Kurzzeitstabilität von Stromquellen, die nur bei einigen  $10^{-6}$  liegt. Durch Modifikationen der bestehenden Messeinrichtung kann der Einfluss der mangelnden Stabilität stark reduziert werden. (B. Schumacher, FB 2.1, bernd.schumacher@ptb.de)

##### **Erweiterung der Kalibriermöglichkeiten von Kalibratoren**

Das Dienstleistungsangebot für die Weitergabe der Größen Transferdifferenz bei AC-DC-Spannung und -Stromstärke wurde durch die Entwicklung und Inbetriebnahme eines Messplatzes zur Kalibrierung von Kalibratoren verbessert. (T. Funck, FB 2.1, torsten.funck@ptb.de)

##### **WERAN – Wechselwirkung von Windenergieanlagen mit terrestrischer Navigation / Radar**

Die Energiewende erfordert einen massiven Anschluss von regenerativen Energiequellen an das Versorgungsnetz. In Deutschland werden daher zahlreiche Windenergieanlagen (WEA) on- und offshore aufgebaut oder im Repowering-Verfahren erneuert. In Genehmigungsverfahren für WEA muss festgestellt werden, ob die WEA Einrichtungen der terrestrischen Navigation bzw. den Betrieb von Radaranlagen stören, um den hoheitlichen Belangen der Deutschen Flugsicherung, der militärischen Luftüberwachung sowie des Deutschen Wetterdienstes gerecht zu werden. Das Projekt WERAN soll für diese Beurteilung die technisch-wissenschaftliche Grundlage liefern. (T. Schrader, FB 2.2, thorsten.schrader@ptb.de)

##### **Ringvergleich zur Messung der elektrischen Feldstärke im Rahmen des Deutschen Kalibrierdienstes (DKD) abgeschlossen**

Ein im Rahmen des Deutschen Kalibrierdienstes (DKD) organisierter Ringvergleich für elektrische Feldstärke wurde erfolgreich abgeschlossen. Die Ergebnisse und daraus folgende Handlungsempfehlungen sind bei der Kleinheubacher Tagung 2015 der Union Radio Scientifique Internationale (U.R.S.I.) eingereicht worden. (T. Kleine-Ostmann, FB 2.2, thomas.kleine-ostmann@ptb.de)

##### **Europaweites Forschungsprojekt für planare Streuparameter-Messtechnik gestartet**

Bedingt durch die zunehmende Arbeitsgeschwindigkeit moderner elektronischer Geräte werden zuverlässige Charakterisierungsmethoden für integrierte Schaltungen und Bauelemente bis in den Mikrowellenbereich benötigt. Bei planaren Schaltungen werden dafür in der Regel On-Wafer-Streuparametermessungen durchgeführt, deren Unsicherheiten bisher allerdings weitgehend unbekannt sind. Ziel des Projekts ist die Bestimmung und Reduktion dieser Unsicherheiten, um die Rückführung planarer Streuparametermessungen bis hin zu Submillimeter-Wellenlängen zu ermöglichen. (U. Arz, FB 2.2, uwe.arz@ptb.de)

## **Präzisionsmesssystem für hohe Wechselspannungen „PS-HVAC“**

Im Rahmen der Erneuerung und Weiterentwicklung von Hochspannungsmesseinrichtungen wurde ein neues Präzisionsmesssystem für hohe Wechselspannungen bis 800 kV und Frequenzen von 10 Hz bis 400 Hz entwickelt und aufgebaut. Das System basiert auf der Erfassung des Ladestroms von Hochspannungsdruckgaskondensatoren und der Konvertierung dieses Stromes in ein digitales Spannungssignal. (J. Meisner, FB 2.3, johann.meisner@ptb.de)

## **Elektromobilität: Beurteilung magnetischer Streufelder von induktiven Ladesystemen**

Elektrisch betriebene Busse mit induktiven Ladesystemen werden derzeit vielerorts im öffentlichen Personennahverkehr erprobt. Induktive Energieübertragungsverfahren ermöglichen es, die Akkumulatoren der Busse innerhalb der üblichen Haltezeiten auf- bzw. nachzuladen. Die dabei auftretenden magnetischen Streufelder müssen unterhalb der gesetzlichen Grenzwerte liegen, um gesundheitliche Schäden der Passagiere und Fahrer auszuschließen. Nun wurde ein mobiles Messsystem entwickelt, mit dem diese magnetischen Wechselfelder rückgeführt gemessen werden können. (H. Harcken, FB 2.5, hans.harcken@ptb.de)

## **Metrologie für die Gesellschaft**

### **Kooperation von OFFIS e. V. und PTB zur Einführung einer standardisierten Technik für die eichrechtkonforme Anzeige von Smart-Meter-Gateway-Daten**

Die PTB hat mit dem Oldenburger Forschungs- und Entwicklungsinstitut für Informatik OFFIS e. V. einen Kooperationsvertrag abgeschlossen, um gemeinsam einen Beitrag zur Digitalisierung der Energiewende zu leisten. Gegenstand der Vereinbarung ist die Einführung von Datenformaten und -technologien in Deutschland, die auf dem amerikanischen Green-Button-Standard basieren. (M. Kahmann, FB 2.3, martin.kahmann@ptb.de)

### **Latenzzeitmesseinrichtung für moderne elektronische Elektrizitätszähler**

An der PTB wurde erstmals eine zeitlich rückgeführte Messeinrichtung erstellt, die es ermöglicht, die Latenzzeiten eines modernen elektronischen Elektrizitätszählers mit integriertem Kommunikationsadapter zu bestimmen. Hierbei können sowohl die Latenzzeit der digitalen Kommunikation mit einem Smart-Meter-Gateway als auch die Latenz ermittelt werden, die beim Erfassen der analo-

gen Eingangsgrößen am Zähler zusätzlich auftritt. (C. Leicht, FB 2.3, christoph.leicht@ptb.de)

### **Entwicklung eines Leistungsverstärkers für Bürdenmesssysteme**

Die derzeit im Bereich der Prüfung und Kalibrierung von Normalbürden für Messwandler eingesetzte Bürdenmesseinrichtung ist vollständig modernisiert und in den Laborbetrieb überführt worden. Dazu wurde ein neuartiger mikrokontroller-geregelter Verstärker zur Prüfgrößenerzeugung mit einer Ausgangsleistung von 700 VA entwickelt. (E. Mohns, FB 2.3, enrico.mohns@ptb.de)

## **Internationale Angelegenheiten**

### **Gemeinsames Forschungsprojekt „Microwave and terahertz metrology for homeland security (THz Security)“ abgeschlossen**

Im Mai 2015 wurde das Forschungsprojekt „Microwave and terahertz metrology for homeland security (THz Security)“ erfolgreich beendet, in dem die PTB zusammen mit fünf anderen nationalen Metrologieinstituten und weiteren Partnern aus dem Bereich der Industrie und der Universitäten an der Rückführung von Messgrößen im THz-Frequenzbereich gearbeitet hat. (T. Kleine-Ostmann, FB 2.2, thomas.kleine-ostmann@ptb.de)

### **Kick-Off Veranstaltung für das EMPIR-Projekt ACQ-PRO**

In der PTB fand die Kick-off-Veranstaltung für das EMPIR-Projekt ACQ-PRO statt. Eingebettet war ein zweitägiges Training an sechs verschiedenen Wechselspannungs-Quantennormalen der PTB. (R. Behr, FB 2.6, ralf.behr@ptb.de)



# Abteilung 3

## Chemische Physik und Explosionsschutz



Die SI-Basiseinheit Mol und die Metrologie in der Chemie, die klassischen Hauptsätze der Thermodynamik und sicherheitsrelevante Fragen im Explosionsschutz bestimmen die Arbeit der Abteilung *Chemische Physik und Explosionsschutz*.

Dies umfasst Forschung und Entwicklung für chemisch-analytische Primärmethoden und Normale besonders dort, wo Messungen eine besondere gesellschaftliche Bedeutung haben wie z. B. im Umweltschutz, der Gesundheit und der Energieforschung. Dazu gehören auch die Realisierung der metrologischen Basis für die Messung von kalorischen Größen, von Flüssigkeitseigenschaften und für die Messung von Drücken.

Ebenso gehören Forschung und Entwicklung von Maßnahmen zur Vermeidung von Brand- und Explosionsgefahren zu den satzungsgemäßen Aufgaben der PTB wie

- gefährliche Mengen oder Konzentrationen von Stoffen, die zu Brand- oder Explosionsgefahren führen können,
- Zündquellen oder Bedingungen, die Brände oder Explosionen auslösen können,
- schädliche Auswirkungen von Bränden oder Explosionen auf die Gesundheit und Sicherheit von Menschen.

In allen Arbeitsbereichen werden Grundlagen erarbeitet, weiterentwickelt, bewahrt und für die Allgemeinheit auf vielfältige Weise nutzbar gemacht. Dies reicht von der Weitergabe der Einheiten bis zur Politikberatung besonders im Explosionsschutz.

Die Bearbeitung der fachlichen Aufgaben der Abteilung erfolgt in den Fachbereichen *Metrologie in der Chemie, Gasanalytik und Zustandsverhalten, Thermophysikalische Größen, Explosionsschutz und Energietechnik, Explosionsgeschützte Sensorik und Messtechnik, Grundlagen des Explosionsschutzes*.

Titelbild:

unten: Forschungsflugzeug HALO. Auf dem Rumpf sind diverse „Einlass-Systeme“ zu sehen – zwei gehören zum PTB/FJZ Mess-System.

oben: Start des Forschungsflugzeuges HALO mit dem neuen Hygrometer HAI an Board. (Foto: Mahesh Kumar Sha, KIT)

Schwerpunktt Themen sind in diesem Jahr die neu etablierten Verfahren zur Realisierung einer primären und sekundären Zählmethode von Partikeln, die besonders bei Abgasmessungen an Verbrennungsmotoren von stark ansteigender Bedeutung sind, sowie die Abschätzung von Messunsicherheiten bei Ringvergleichen, die auch bei Messungen im Explosionsschutz immer wichtiger werden.

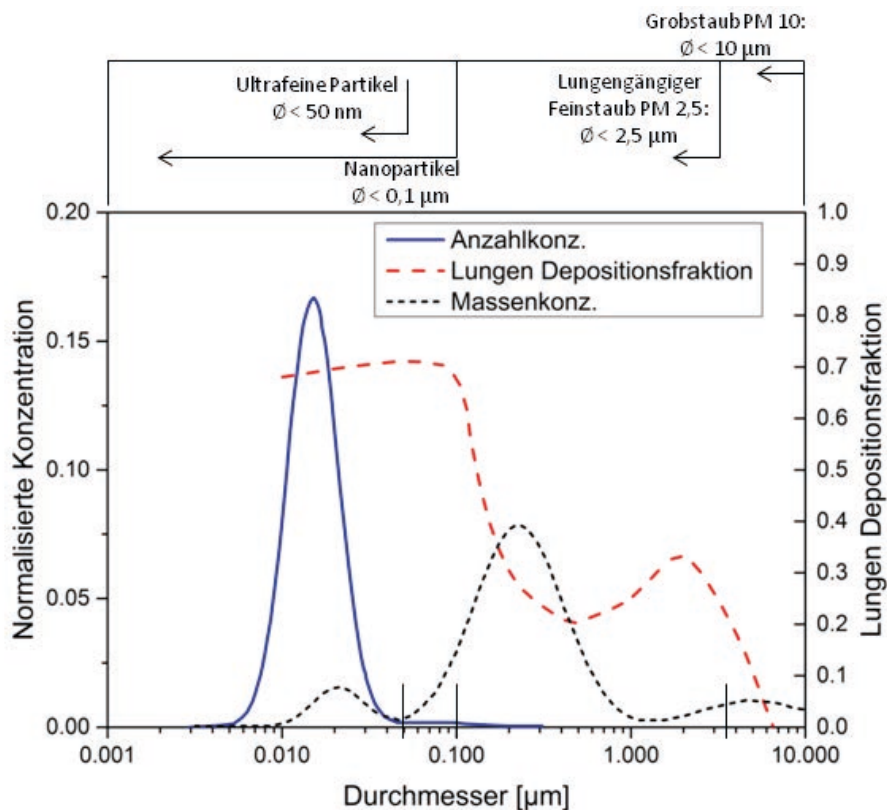
### Rückführung von Nanopartikelanzahlmessungen in Kfz-Abgasen

Im Jahr 2015 ist in der PTB durch die Entwicklung und Realisierung einer primären und sekundären Zählmethode von Partikeln die rückgeführte Kalibrierung der Partikelanzahl in Verbrennungsmotorabgasen möglich geworden.

Von den im Jahre 2014 in Deutschland zugelassenen 53 Millionen PKW werden je etwa die Hälfte mit Benzin- bzw. Dieselmotoren betrieben, was zeigt, dass die klassischen Verbrennungsmotoren, trotz vielfältiger alternativer Antriebstechnologien wie Erdgas, Hybrid oder Elektro, nach wie vor dominierend sind. Die Problematik mobilitätsbedingter Schadstoffemissionen und die damit verbundenen negativen klimatischen Einflüsse, sowie die, vor allem in urbanen Räumen, erheblichen gesundheitlichen Auswirkungen, bleiben daher weiter im Fokus der Umweltwissenschaften und der medizinischen Forschung (siehe IPCC Report 2013 und WHO Report 2012 bzw. REVIHAAP Projekt). Weitere, deutliche Emissionsminderungen sind daher unbedingt anzustreben. Die stetige Optimierung von Verbrennungsmotoren und Abgasreinigungseinrichtungen führte in den letzten 20 Jahren bereits zu drastisch gesunkenen Partikelemissionen: „Grobstaub“ nahm zwischen 1990 und 2012 um 80 % ab, während Feinstaubemissionen (unter 2,5 µm) sich von 0,18 Mio. Tonnen in 1995 auf 0,11 Mio. Tonnen (-38 %) in 2011 verringerten. Erreicht wurde dies durch eine stetig verbesserte Abscheidung der Feinstaubpartikel. Betrachtet man jedoch die Anzahl der emittierten Nanorußpartikeln (unter 100 nm), so sind die Werte immer noch sehr hoch (siehe Bild 1).

Die Abgasnormen Euro 5b und Euro 6 forderten aus diesem Grund erstmalig bindend und europaweit (UN/ECE Regulation No. 83) eine Begrenzung der Partikelanzahl- bzw. der Nanorußpartikelemission für diesel- und benzinangetriebene Fahrzeuge auf  $6 \cdot 10^{11}$  Partikel/km für Diesel- und  $6 \cdot 10^{12}$  Partikel/km für Otto-Motoren, die ab September 2017 auch auf den Dieselmotorenwert ( $6 \cdot 10^{11}$  Partikel/km) abgesenkt werden. Begleitend dazu wurde das Particle Measurement Program (PMP) als europäische, messtechnische Richtlinie entwickelt. Die-

Bild 1: Normierte Größenverteilungen motorischer Rußpartikelemissionen, dargestellt als Massenkonzentration ( $\mu\text{g}/\text{cm}^3$ ), Anzahlkonzentration (Partikelzahl/ $\text{cm}^3$ ), sowie die Lungendepositionsfraction (modifiziert nach Kittelson und Kraft, 2014)



se schreibt vor, mit welchem Messsystem und mit welchem Messverfahren (ISO 27891) die Partikelanzahl-emissionen in Kfz-Abgasen zu bestimmen sind.

Die wesentlichen Komponenten eines PMP-Messsystems sind ein Aerosolverdünnungssystem, ein System zur thermischen Konditionierung (Aufheizung bis  $350\text{ }^\circ\text{C}$ ) sowie ein Kondensationspartikelzähler (condensation particle counter, CPC).

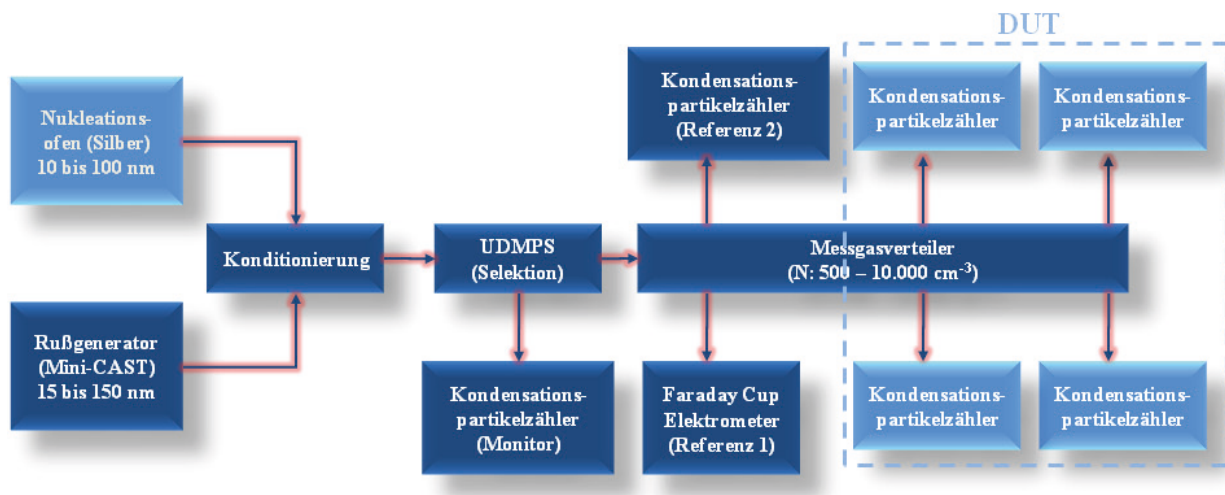
Spezielle Engine-Exhaust-CPCs werden auf die effiziente Detektion bestimmter, in der Regulierung genau festgelegter Partikelgrößen ausgelegt, da gemäß PMP-Richtlinie Partikel ab  $23\text{ nm}$  mit einer Zähleffizienz von  $50\%$  zu detektieren sind.  $55\text{-nm}$ -Partikel sind mit einer Detektionseffizienz von über  $90\%$  zu erfassen. Das Ziel dieser Festlegung auf einen Durchmesser bei  $23\text{ nm}$  ist es, jene Partikel zu zählen, die eine hohe Wahrscheinlichkeit für einen festen Rußkern als Primärpartikel für ein Rußagglomerat besitzen.

Mangels geeigneter metrologischer Infrastrukturen werden PMP-konforme CPCs bisher fast ausschließlich beim Messgerätehersteller überprüft und kalibriert. Aufgrund der hohen wirtschaftlichen Relevanz ist bei Homologationsmessungen an Motoren die Messgenauigkeit der CPC von besonderem Interesse. Da unter Feldbedingungen bzw. an den Motorprüfständen bei Partikelanzahlmessungen mitunter Messabweichungen von bis zu

$50\%$  festgestellt wurden, forderten die deutschen Automobilhersteller schon länger eine unabhängige, metrologische Validierung. Mögliche Gründe für die Probleme bestehen darin, dass die meisten CPCs bei der Hersteller-Prüfung auf ein bestimmtes Prüfaerosol adjustiert werden, dessen Eigenschaften nicht ausreichend gut mit denen motorischer Partikel in Zusammenhang gebracht werden können. Daher werden geräteintern Korrekturfaktoren hinterlegt, die für motorisches Abgas eine Anpassung der Zähleffizienz des CPC ermöglichen.

Im Rahmen des europäischen Forschungsprojektes ENV02 „PARTEMISSION“ innerhalb des EMRP-Forschungsprogrammes wurden daher verschiedene Möglichkeiten zur metrologisch definierten Zählung von Rußpartikeln in Motor-Abgas untersucht. Das Projekt wurde unter Federführung der PTB in Zusammenarbeit mit dem europäischen Forschungsinstitut JRC in Ispra, Italien, sowie den nationalen Metrologieinstituten (NMI) in der Schweiz, England, Finnland und Dänemark (METAS, NPL, FMI, DFM) durchgeführt. Ziel war es, ein Partikelanzahlnormal für Motor-Abgas zu entwickeln. Zudem wurden Kriterien für ein geeignetes Prüfaerosol definiert und Referenzmessmethoden festgelegt, um die Partikelzählung an eine SI-Einheit anzubinden.

Für dieses Aufgabengebiet wurde im PTB-Fachbereich 3.2 eigens eine neue Arbeitsgruppe für Parti-



kel- und Aerosolmesstechnik gegründet. Dort wurden verschiedene Speziallabore für die definierte Aerosoldiagnostik (insbesondere hinsichtlich Partikelanzahl und -größe) sowie umfangreiche Apparaturen zur Erzeugung von Prüfaerosolen entwickelt und aufgebaut (siehe Bild 2).

Diese Apparaturen zur Erzeugung von Nanopartikeln enthalten als wichtigste Komponente einen Rußgenerator (Mini-CAST (Combustion Aerosol Standard)) bzw. einen Nukleationsofen. Im Rußgenerator wird reines Propan unter Beimischung von Luft verbrannt, wobei die Verbrennung und damit die Eigenschaften der gebildeten Rußnanopartikel gezielt gesteuert werden können. Die Charakterisierung des Rußgenerators und die Modifikationen der Aerosolkonditionierung waren das Thema einer Masterarbeit in der Arbeitsgruppe 3.23 in Zusammenarbeit mit der Ostfalia Wolfenbüttel. In Zusammenarbeit mit dem PTB-Fachbereich 8.2 wurde mithilfe von CFD-Simulationen die Durchmischung und Konditionierung untersucht, um eine weitere Optimierung der Partikelanzahl und der Partikelgrößenselektion zu erreichen.

Im zweiten Aerosol-Generator werden auf Basis eines Nukleationsofens Silbernanopartikel definiert hergestellt, um ein Prüfaerosol mit sphärischen Partikeln im gleichen Größen- und Anzahlbereich wie die Rußnanopartikel zu erhalten. Hierbei macht man sich die homogene Keimbildung aus einem übersättigten Metaldampf zu nutze. Die Stabilität und Eignung eines Partikelanzahlnormal auf Basis sphärischer Silbernanopartikel wurde in Kooperation mit der TU Braunschweig im Rahmen einer Diplomarbeit verwirklicht.

Ein wesentliches Ziel der beiden Aerosolgeneratoren war es, ein optimales Prüfaerosol zur Validierung des kompletten PMP-Systems zu entwickeln. Dazu haben sich die NMIs im ENV02-Projekt geeinigt,

Bild 2: Schematischer Aufbau zur Kalibrierung von Kondensationspartikelzählern für Motor-Abgas, bestehend aus zwei Generatoren, den dazugehörigen Konditionierungsstrecken und einem System zur monodispersen Selektion ultrafeiner Partikel (Ultrafine differential mobility particle sizer, UDMPS) sowie den primären und sekundären Referenzgeräten mit den Devices under Test (DUT)

Silber als Prüfaerosol einzusetzen, da es sphärisch ist und auch bei hohen Temperaturen thermisch und chemisch stabil bleibt. Somit können Partikelverluste in PMP-Systemen bei unterschiedlichen Temperaturstufen sowie Aerosolverdünnungssystemen besser miteinander verglichen werden.

Eine weitere wesentliche Komponente im Messaufbau zur Kalibrierung der CPCs für motorisches Abgas ist das Ultrafine differential mobility particle sizer (UDMPS)-System (siehe Bild 2). Hier können die Silber- sowie auch Rußnanopartikel hinsichtlich ihrer Größe definiert aufgeladen und anschließend nach ihrer Größe selektiert werden. Erst danach beginnt die eigentliche Kalibrierung der Partikelanzahl. Dafür werden zwei verschiedene Methoden zur Referenzierung der Partikelanzahl verwendet.

Als primäre Messmethode dient hierbei ein Aerosol-Elektrometer, das vor allem aus einem elektrisch leitenden Faraday'schen Käfig besteht. Treffen die positiv oder negativ geladenen Partikel aus dem UDMPS auf den unter Spannung stehenden Käfig des Elektrometers, so kann ein sehr kleiner, der Anzahl der geladenen Partikel proportionaler Stromfluss im Femto- bis Pico-Amperebereich detektiert werden. Ein Vorteil des Elektrometers gegenüber den CPCs liegt darin, dass es deutlich höhere Partikelkonzentrationen (bis zu  $10^6/\text{cm}^3$ ) und deutliche kleinere Partikelgrößen (bis zu 2 nm) detektieren kann. Wichtig ist auch, dass sich Elektrometer auf die SI-Einheit Ampere rückführen lassen. Ein Nachteil ist, dass die Verteilung der Ladungen auf den



Partikeln bekannt sein muss. Dazu ist oberhalb der Partikelgrößen von 100 nm eine Ladungskorrektur notwendig. Außerdem muss bei geringen Konzentration von unter 1000 Partikeln/cm<sup>3</sup> das elektrische Rauschen des Faraday'schen Käfigs berücksichtigt werden. Für die sekundäre Referenzmethode wird ein CPC eingesetzt, der eine deutlich geringere Nachweisgrenze bezüglich der Partikelgröße hat als jene PMP-CPC für Motor-Abgas. Die CPC-Technik hat den großen Vorteil, dass auch bei sehr geringen Konzentrationen von bis zu 1 Partikel/cm<sup>3</sup> genau gemessen werden kann. Nachteilig ist, dass nur bis 10 000 Partikel/cm<sup>3</sup> mit stabiler Messgenauigkeit gezählt werden kann. Die Korrekturen wie etwa die Koinzidenz-Korrektur sind herstellerspezifisch und können von Baureihe zu Baureihe variieren.

Beide Referenzmethoden wurden innerhalb der EURAMET-Vergleiche 1244 und 1286 international validiert. Es waren in beiden Fällen die ersten metrologischen Vergleiche in diesem Themengebiet. Sie wurden in der CCQM Working Group on Gas Analysis (GAWG) im April 2015 vorgestellt und führten im Juli 2015 für den Fachbereich 3.2 zu den weltweit ersten CMC-Einträgen für Aerosole. Damit gelang es, sowohl das primäre Partikelzählverfahren mittels Aerosol-Elektrometer als auch die sekundäre mittels Kondensationspartikelzähler international in der Metrologie zu verankern.

Partikelanzahlkalibrierungen für Motor-Abgas werden in der PTB-Arbeitsgruppe 3.23 in Zukunft mit der primären und sekundären Zählmethode durchgeführt, die 3.23 als Dienstleistung nach Abschluss der internen Auditierung voraussichtlich im Frühsommer 2016 anbietet.

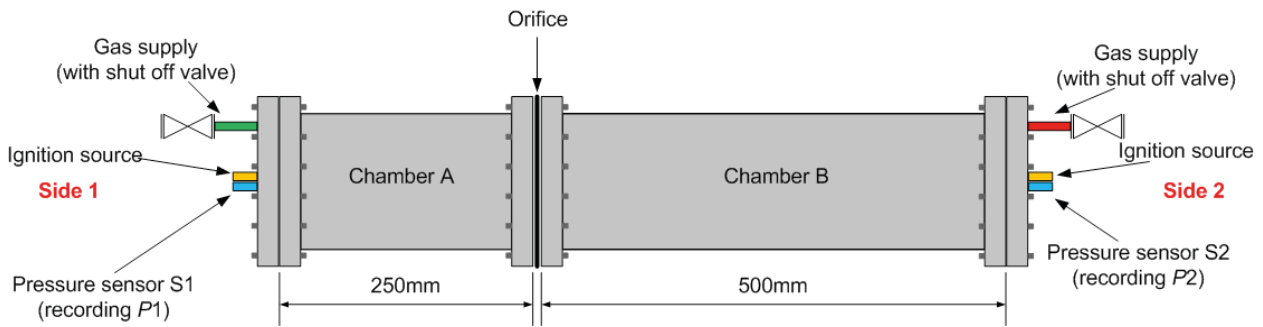
Zukünftig ist mit einigen Änderungen für die Kalibrierung der Partikelanzahl zu rechnen. Im Gremium des PMPs wird derzeit die Absenkung der jetzigen Dp50-Zähleffizienz von 23 nm auf 10 nm diskutiert. Zudem fordert die neue Norm Euro 6c ab Herbst 2017 neben den Rollenprüfstandsmessungen auch Messungen auf der Straße (real driving emissions, RDE) zur Typenprüfung bzw. Charakterisierung der Motoremission. Die geplante erhebliche Änderung der Prüfmethode wird zur Einführung einer Vielzahl neuer, sehr kompakter und ultramobiler Messverfahren und Sensortypen führen, die jedoch erst metrologisch genau zu charakterisieren sind. In diesen PEMS (Portable Emission Measurement Systems) genannten Systemen werden neue, stark vereinfachte Partikelanzahlsensoren verbaut, die die Partikelanzahl nicht auf Kondensationsbasis bestimmen. Die gegenwärtige Rückführungspraxis

ist daher an diese neuen Methoden zu adaptieren und über internationale Vergleich zu validieren.

### **Betrachtung der Messunsicherheitseinflüsse bei der dynamischen Messung von Explosionsdrücken**

Die Abschätzung von Messunsicherheiten stand im Jahr 2015 im Mittelpunkt des Ringvergleichsprogramms „Explosionsdruck“. Die aktuelle Methode zur Ermittlung der Messunsicherheit bei der Bestimmung von Explosionsdrücken wird „exakte Methode“ genannt, die traditionell von den Prüflaboratorien für explosionsgeschützte Geräte (Ex-Prüflaboratorien) im IECEx-System (International Electrotechnical Commission System for Certification to Standards Relating to Equipment for Use in Explosive Atmospheres) angewendet wird. Gemeint ist die Minimierung der Variabilität verschiedener Parameter bzw. Messunsicherheitseinflüsse, um die Konformität mit den vorgegebenen Grenzen einzuhalten. Parameter sind beispielsweise die Spannungsversorgung, Temperatur und Luftfeuchtigkeit der Umgebung, die Volumenkonzentration der Gase sowie die Temperatur und der Druck der Brennstoff-Luft-Gemische. Die Untersuchungen werden unter „worst case“-Bedingungen mit hohen Sicherheitsfaktoren durchgeführt, sodass dem Messergebnis eines Ex-Prüflaboratoriums bisher üblicherweise keine gesonderte Information über den tatsächlichen Messunsicherheitsbetrag mitgeliefert wird. Die Auswertung eines internationalen Ringvergleichs zwischen Ex-Prüflaboratorien hat allerdings gezeigt, dass es trotz der Verwendung der „exakten Methode“ zu signifikant abweichenden Ergebnissen bei der Ermittlung des Explosionsdruckes kommt.

Die IEC-Normengruppe 60079-0 ff. enthält die weltweit anerkannten Anforderungen an explosionsgeschützte Geräte. Die von der PTB entwickelten internationalen Vergleiche zwischen den etwa 70 Ex-Prüflaboratorien sollen garantieren, dass die Qualität der Prüfungen überall möglichst gleich ist. Trotz stetiger Anpassung und Verbesserung der Normen-anforderungen gibt es jedoch immer noch Bereiche, die einen gewissen Interpretationsspielraum bei der Durchführung bestimmter Prüfungen zulassen und unterschiedliche Ergebnisse zur Folge haben können. Beispielsweise ist die Messung des Explosionsdruckes in Geräten, die in explosionsgefährdeten Bereichen eingesetzt werden dürfen, eine elementare Prüfung der Zündschutzart „Druckfeste Kapselung“. Das Ergebnis dieser Prüfung entscheidet neben weiteren Prüfungen darüber, ob ein Betriebsmittel den normativen Anforderungen entspricht.



Am Ringvergleichsprogramm „Explosionsdruck“ waren in einer Pilot-Studie insgesamt 37 internationale Ex-Prüflaboratorien beteiligt. Das Prüfverfahren zur Bestimmung des Explosionsdruckes ist in der internationalen Norm IEC 60079-1 festgelegt und damit für alle Ex-Prüflaboratorien verbindlich. Erweiterte Vorgaben wie beispielsweise eine bestimmte Anzahl von Messungen sowie die Festlegung der Messorte waren ebenfalls für alle Teilnehmer identisch und trugen zur Verbesserung der Vergleichbarkeit bei. Das Prüfmuster (siehe Bild 3) bestand aus zwei stählernen rohrförmigen Kammern der Länge 250 mm (Kammer A) und 500 mm (Kammer B), die beidseitig durch Flansche verschlossen wurden. Der Innendurchmesser betrug jeweils 161,5 mm. Um die Variationsmöglichkeit der Konfiguration zu erhöhen, bestand das Prüfmuster zusätzlich aus einer Blende mit einer 15-mm-Bohrung, die zwischen den Kammern installiert werden konnte. Der Explosionsdruck wurde jeweils für die einzelnen Kammern (Konfiguration a und b) sowie für die Kombinationen der Kammern mit Blende (Konfiguration c und d) und zwei nach IEC 60079-1 ausgewählten Brennstoff-Luft-Gemischen bestimmt. Bei allen durchgeführten Messungen waren die in der IEC 60079-1 sowie die allgemein in der ISO/IEC 17025 festgelegten Anforderungen einzuhalten.

Das Diagramm in Bild 4 zeigt die Ergebnisse für die Konfiguration a) (einzelne Kammer, Länge 250 mm). Das Ethylen-Luft-Gemisch mit einer Volumenkonzentration von  $8\% \pm 0,5\% \text{ C}_2\text{H}_4$  wurde an einer der Stirnflächen durch eine Zündkerze gezündet. An der gegenüberliegenden Seite der Zündung war für die Bestimmung des Explosionsdruckes mittig ein Druckaufnehmer installiert (siehe Bild 3).

Bild 3: Prüfmuster des Ringvergleichsprogramms „Explosionsdruck“

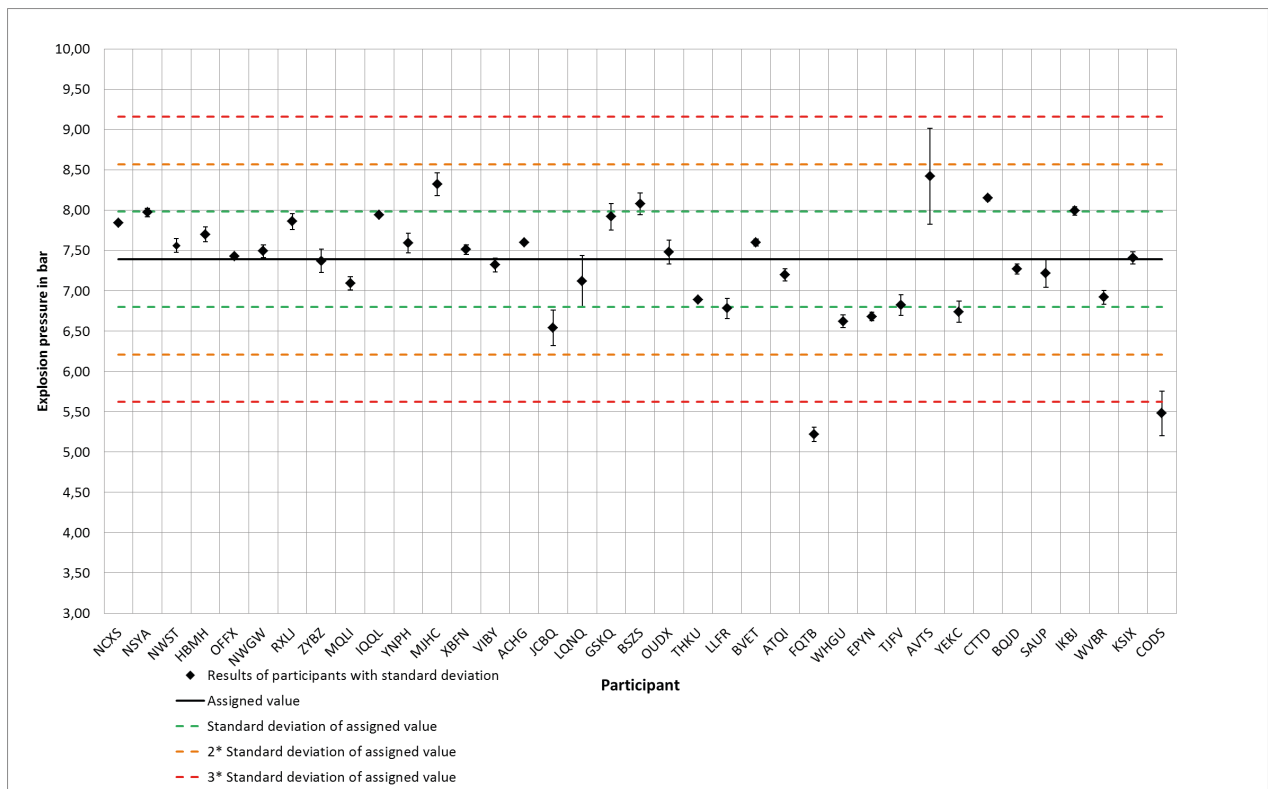
Obwohl die Ex-Laboratorien die Messunsicherheit mithilfe der „exakten Methode“ berücksichtigen, ergab die Auswertung des Ringvergleichsprogramms „Explosionsdruck“ teilweise signifikante Unterschiede bei den Messergebnissen. Um eine Aussage über die Messunsicherheiten der jeweiligen Messergebnissen zu erhalten, wurde das Messunsicherheitsbudget für die Messung des Explosionsdruckes nach GUM bestimmt (siehe Tabelle 1). Das verwendete Prüfmuster ist gemäß Vorgabe aus dem Ringvergleichsprogramm „Explosionsdruck“ die Konfiguration a) (einzelne Kammer, Länge 250 mm). Alle anderen Randbedingungen (Ort des Druckaufnehmers, verwendetes Brennstoff-Luft-Gemisch, etc.) entsprechen ebenfalls den Vorgaben des Ringvergleichsprogramms.

Die Betrachtung der im Endergebnis bestimmten erweiterten Messunsicherheit von  $U_{0,95} = 0,25 \text{ bar}$  und der Vergleich mit den Ergebnissen des Ringvergleichsprogramms „Explosionsdruck“ zeigen, dass es andere Einflussgrößen geben muss, die die teilweise signifikanten Abweichungen verursachen. Mit der durchgeführten Messunsicherheitsanalyse (und der hier verwendeten Prozessgleichung) wurden sowohl die systematischen Messunsicherheitseinflüsse der Messgeräte (gerätespezifische Messunsicherheitseinflüsse) als auch die statistischen Messunsicherheitseinflüsse der einzelnen Messgrößen erfasst.

Während der Durchführung des Ringvergleichsprogramms „Explosionsdruck“ wurden die von den Laboratorien verwendeten Messgeräte abgefragt.

Wert	Erweiterte MU	Überdeckung	Monte-Carlo Durchläufe
7,95 bar	$\pm 0,25 \text{ bar}$	95 %	$50 \cdot 10^6$

Tabelle 1: Endergebnis der Messunsicherheitsbestimmung (nach Monte-Carlo Simulation) bei der Messung des Explosionsdruckes



Diese verursachen im Wesentlichen vergleichbare Messunsicherheitsbeiträge. Als sehr hilfreich bei der Analyse der Teilnehmerergebnisse hat sich aber die Abfrage der Explosionsdruckverlaufskurven der teilnehmenden Laboratorien erwiesen. Hierbei wurden auffällige und untypische Kurvenverläufe bemerkt, welche auf Bedienungsfehler bzw. Messunsicherheitseinflüsse durch den Faktor Mensch zurückzuführen waren. Im Detail ließen sich folgende Bedienungsfehler identifizieren, die zu mehr oder weniger signifikanten Abweichungen bei den Explosionsdruckbestimmungen im Programm „Explosionsdruck“ führten:

- fehlende oder ungenügende Temperaturkompensation bei den verwendeten piezoelektrischen Druckaufnehmern
- fehlerhafte Installation der Druckaufnehmer am Prüfmuster
- fehlerhafte Konfiguration der verwendeten Messsysteme (z. B. der Oszillografen)
- fehlerhafte Präparation des Prüfmusters
- fehlende kritische Betrachtung der Messergebnisse.

Bild 4: Teilnehmerergebnisse in anonymisierter Form für Konfiguration a) des Ringvergleichsprogrammes „Explosionsdruck“

Die Analyse der Ergebnisse des Ringvergleichsprogrammes „Explosionsdruck“ unter Berücksichtigung der Betrachtung der Messunsicherheitseinflüsse bei der dynamischen Messung von Explosionsdrücken zeigt, dass die Hauptursache für die Abweichungen in der mangelnden Kompetenz des Personals zu suchen ist. Dies wurde auch dadurch bestätigt, dass bei einer Wiederholungsmessung innerhalb des Ringvergleichsprogrammes (Improvement Loop) mit gleicher Messtechnik und gleichen Randbedingungen, aber bei vorheriger Diskussionen der Bedienungsfehler die Abweichung deutlich verringert werden konnte.

Die Betrachtung der Messunsicherheit sollte bei der Bestimmung von Explosionsdrücken, gerade auch im Hinblick auf durchzuführende Ringvergleiche, in Zukunft stärker berücksichtigt werden. Es ist jedoch auch klar, dass gerade der größte Einflussfaktor, der Mensch, sehr schwer zu quantifizieren ist. Eine wirkungsvolle Maßnahme zur Verringerung dieses Einflussfaktors ist die stetige Schulung der mit den Messungen beauftragten Personen.

## In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

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

### Grundlagen der Metrologie

#### Weltweit erstes Magnesium-Isotopenreferenzmaterial mit praxisingerechter Messunsicherheit und SI-rückgeführten Isotopenverhältnissen

Durch Übertragung der im Rahmen des Avogadro-Projektes in der PTB entwickelten mathematischen und experimentellen Methoden zur Messung extrem genauer und SI-rückgeführter Isotopenverhältnisse wurden unter Federführung des Fachbereiches „Anorganische Spurenanalytik“ der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) und mit Unterstützung des LGC, UK, drei Magnesium-Isotopenreferenzmaterialien (IRM) zur Marktreife gebracht, die weniger als ein Zehntel der Messunsicherheit des bisher etablierten IRM (NIST SRM 980) aufweisen und erstmals – dank SI-Rückführbarkeit – die Bestimmung von Isotopenverhältnissen (und molaren Massen) von Magnesium auf einer absoluten Skala erlauben. (J. Noordmann, O. Rienitz, FB 3.1, [janine.noordmann@ptb.de](mailto:janine.noordmann@ptb.de), [olaf.rienitz@ptb.de](mailto:olaf.rienitz@ptb.de))

#### Zuverlässige Bestimmung der Hämoglobin-A2-Fraktion zur Früherkennung von $\beta$ -Thalassämie-Trägern

Das wichtigste Merkmal zur Früherkennung von Trägern der  $\beta$ -Thalassämie, einer genetischen Störung der Blutbildung, ist eine gegenüber Gesunden leicht erhöhte Fraktion des Hämoglobin-A2 (HbA2), einer von mehreren Formen des Hb im Blut. Der geringe Unterschied in der HbA2-Fraktion setzt für eine richtige Diagnose die zuverlässige Messung sowohl von HbA2 als auch von Gesamt-Hb voraus. Gemeinsam mit dem Referenzlaboratorium des Instand e. V. wurde im Rahmen der IFCC ein massenspektrometrisches Verfahren zur Bestimmung der HbA2-Fraktion im Blut entwickelt. Das neue Verfahren soll zukünftig zum Rekalibrieren von Routineverfahren verwendet werden, um deren Zuverlässigkeit zu erhöhen. (C. Arsene, FB 3.1, [christian.arsene@ptb.de](mailto:christian.arsene@ptb.de))

#### Optisches Verfahren zur Quantifizierung großer Biomoleküle validiert

Ein neues Verfahren zur Bestimmung der Gesamthämoglobin-Konzentration in Blutserum auf Basis der Isotopenverdünnungs-Ramanspektrometrie wurde in einer Vergleichsmessung mit anderen po-

tenziellen Referenzmessverfahren erfolgreich validiert. (R. Stosch, FB 3.1, [rainer.stosch@ptb.de](mailto:rainer.stosch@ptb.de))

#### Potenzielle Referenzmessverfahren für Hämoglobin, Transferrin und Superoxiddismutase in Humanproben

Im Rahmen des im Mai abgeschlossenen EMRP-Projektes HLT05 „Metallomics“ konnten Verfahren für die Bestimmung von Hämoglobin, Transferrin und Superoxiddismutase in Blut bzw. Serum auf Basis der Isotopenverdünnungsanalyse entwickelt werden. Die im Projekt durch die europäischen Partner entwickelten Methoden wurden zudem in dem von der PTB organisierten EURAMET-Ringvergleich „Determination of transferrin in human serum“ eingesetzt. (C. Swart, FB 3.1, [claudia.swart@ptb.de](mailto:claudia.swart@ptb.de))

#### Laserspektroskopische Isotopenverhältnis-Messungen für Treibhausgase

Im Zusammenhang mit der Bearbeitung des EMRP-Projekts „Metrology for high-impact greenhouse gases“ wurde mit dem Aufbau eines Messplatzes zur laserspektrometrischen Isotopenverhältnis-Messung für Treibhausgase wie  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$  und  $\text{CH}_4$  begonnen. In engem Kontakt zu internationalen Partnern sollen messtechnische Konzepte validiert und weiterentwickelt werden, um laserspektroskopische Isotopenverhältnismessungen metrologisch hinsichtlich der möglichen Unsicherheiten zu bestimmen und Möglichkeiten zu deren Rückführung zu untersuchen und zu bewerten. Auch weitergehende Einsatzmöglichkeiten in der Gasmetrologie werden untersucht. (J. Nwaboh, O. Werhahn, FB 3.2, [olav.werhahn@ptb.de](mailto:olav.werhahn@ptb.de))

#### Bestimmung spektraler Referenz-Linienparameter von Molekülen

In der Fortsetzung des EMRP-Projekts EUMETRISPEC (<http://www.eumetrispec.org>) wurden neue Auswerteprozeduren erarbeitet, die das Anpassen experimentell gemessener, hochaufgelöster FTIR-Spektren mit den modernsten Modell-Profilen erlauben, die auch molekulare Verbreiterungsmechanismen höherer Ordnung, wie Linienbreiten-Einengungen (engl. Dicke-Narrowing), geschwindigkeitsabhängige Druckverbreiterungen sowie „Line-Mixing“ modellieren. Diese Entwicklung wurde auch im Zusammenhang mit einer Kooperation mit Kollegen der Universität Paris-Ost, Creteil erreicht, die sich im Rahmen des *Open-Facility-*



Konzeptes des EUMETRISPEC-Projektes an der Auswertung der in der PTB gemessenen Spektren beteiligen. (G. Li, V. Ebert, O. Werhahn, FB 3.2, volker.ebert@ptb.de)

### **Empirisches Verfahren zur Quantifizierung des Gesundheitszustands von Hochenergie-Li-Ionenbatteriezellen mittels elektrochemischer Impedanzspektroskopie entwickelt**

Die PTB hat ein Verfahren entwickelt, um den Gesundheitszustand von Hochenergie-Li-Ionenbatteriezellen zeitsparend zu messen. Dazu wird von der Batterie eine elektrochemische Impedanzspektroskopie angefertigt. Anhand einer von der PTB empirisch ermittelten, spezifischen Referenzkurve kann der Gesundheitszustand auf schnelle Weise gemessen werden. (S. Seitz, FB 3.4, steffen.seitz@ptb.de)

### **Metrologie für die Wirtschaft**

#### **Laser-Spektrometer für CO-Messungen**

Im Rahmen der EMRP-Projekte „Metrology for high-impact greenhouse gases“ (ENV52-HIGH-GAS) und „Metrology for biogas“ (ENG54-BIO-GAS) wurde eine Laser-Spektrometer-Familie für absolute CO-Konzentrationsmessungen (Stoffmengenanteile) in Luft- bzw. Biogas-Matrix entwickelt. Die Spektrometer nutzen DFB-Laser mit Emissionswellenlängen von 2,3  $\mu\text{m}$  bzw. Inter-Kaskaden-Laser mit 4,6  $\mu\text{m}$ . Single-Pass-Gaszellen und Multi-Pass-Zellen mit optischen Weglängen von bis zu 76 m sind in den Systemen einsetzbar. Die Spektrometer können CO-Stoffmengenanteile im Bereich von 150 nmol/mol bis 1000  $\mu\text{mol/mol}$  („ppb- bis ppm-Bereich“) quantifizieren. Derzeit liegt die relative kombinierte Messunsicherheit des CO-Stoffmengenanteils im Bereich von 1 %. (J. Nwaboh, O. Werhahn, FB 3.2, olav.werhahn@ptb.de)

#### **EMRP-Projekt „Metrology for airborne molecular contamination in manufacturing environments“ (IND63 MetAMC) auf der Zielgeraden**

Das Projekt MetAMC steht nach 30-monatiger Bearbeitung kurz vor dem Abschluss. Im Jahr 2015 konnte die AG 3.22 die Arbeiten zur optischen Detektion von kleinsten Mengen luftgetragener molekularer Verunreinigungen (engl. airborne molecular contamination, AMC) abschließen und ein  $\text{NH}_3$ -Cavity-Ring-Down-Spektrometer im Reinraumzentrum der PTB bewerten. Dabei wurde mit hoher Zeitaufösung  $\text{NH}_3$ -Stoffmengenanteile von wenigen nmol/mol in der Reinraumluft erfasst. Als Leiter des Impact-Arbeitspaketes hat sich AG 3.22 maßgeblich an der Präsentation des Projekts auf der Fachmesse Cleanzone ([sefrankfurt.com\) beteiligt, um Projektergebnisse einem großen Fachpublikum zugänglich zu machen. \(N. Luettschwager, O. Werhahn, FB 3.2, olav.werhahn@ptb.de\)](http://cleanzone.mes-</a></p></div><div data-bbox=)

#### **Neues photoakustisches $\text{NH}_3$ -Spektrometer für EMRP-Projekt „Metrology for airborne molecular contamination in manufacturing environments“ (IND63 MetAMC)**

Im Rahmen des EMRP-Projekts MetAMC wurde in AG 3.22 ein Spektrometer zur photoakustischen Detektion von geringsten Mengen Ammoniak entwickelt. Eine Nachweisgrenze im Bereich weniger nmol/mol wurde dabei durch die Verwendung eines neuartigen, optisch-interferometrischen Mikrophons erzielt, das optisch induzierte Druckschwankungen anhand der Schwingung eines kleinen Silizium-Cantilevers vermisst. Eine spezielle Gasaustausch-Methode wurde erarbeitet, um diese Detektionsmethode für die Messung stark adsorbierender Gase nutzbar zu machen. (N. Luettschwager, O. Werhahn, FB 3.2, olav.werhahn@ptb.de)

#### **Start des Kooperationsprojektes zwischen PTB und AVL**

Im Januar 2015 wurde ein Kooperationsprojekt zwischen PTB und einem großen Messgerätehersteller für Abgasmessgeräte, der AVL-List GmbH, gestartet. Es sollen Studien an Ruß-Generatoren und Diesel-Motoren durchgeführt werden, um ein Kalibrier aerosol für physikalische Messmethoden zur partikulären Abgasmessung zu entwickeln. (A. Nowak, V. Ebert, FB 3.2, volker.ebert@ptb.de)

### **Metrologie für die Gesellschaft**

#### **EMRP-Projekt „Metrology for ammonia in ambient air“ (ENV55-Met $\text{NH}_3$ )**

Nach 18 Monaten Laufzeit zeigt das Projekt Met- $\text{NH}_3$  die ersten Ergebnisse. Die AG 3.22 leitet das Arbeitspaket zur Entwicklung eines optischen Transfornormals für absolute Konzentrationsmessungen (Stoffmengenanteile) von Ammoniak in Luft im Konzentrationsbereich von 0 nmol/mol bis 500 nmol/mol („ppb-Bereich“) und arbeitet dabei an der metrologischen Charakterisierung und der Rückführung eines kommerziellen Cavity-Ring-Down-Spektrometers. Neben anderen Konferenzbeiträgen wurde das Projekt auf dem 17<sup>th</sup> International Congress of Metrology (CIM 2015) vorgestellt. Eine Publikation „A metrological approach to improve accuracy and reliability of ammonia measurements in ambient air“ wurde unter Beteiligung aller Projektpartner erstellt und zur Veröffentlichung in der Sonderausgabe CIM-2015 von *Measurement*

*Science and Technology* eingereicht. (A. Pogány, O. Werhahn, FB 3.2, olav.werhahn@ptb.de)

### **Start des EMRP-Projektes SIP-ENV02 Autopart**

Im Nachfolgeprojekt zu ENV02 werden die Projektpartner NPL (Koordination) und PTB gemeinsam dazu beitragen, dass relevante Projektergebnisse aus ENV02 zur Standardisierung der Partikelanzahlmessung für motorische Abgase in die legislativen Gremien wie ISO und PMP eingetragen werden. (A. Nowak, V. Ebert, FB 3.2, volker.ebert@ptb.de)

### **Messung der Dichte von Seewasser mit einer Unsicherheit von 0,002 kg/m<sup>3</sup> bei atmosphärischem Druck**

Im Rahmen des EMRP-Projekts ENV05 wurde die Dichte von Seewasser mit hoher Präzision gemessen. Als Messunsicherheit wurde 0,002 kg/m<sup>3</sup> für Messungen bei Atmosphärendruck und etwa 0,02 kg/m<sup>3</sup> für Messungen unter Druck erreicht.

Die Dichte von Seewasser wird in der Ozeanografie üblicherweise durch die Salinität charakterisiert, die wiederum durch Leitfähigkeitsmessungen ermittelt wird. Dabei dient als Referenz das aus dem Atlantik gewonnene Standardseewasser. Standardseewasser ist natürlichen Ursprungs, es gilt zwar als zuverlässige, kurzzeitstabile Referenz, die Stabilität der Zusammensetzung über Dekaden, die beim Vergleich von Langzeitmessreihen erforderlich ist, ist aber nicht gesichert. Die Dichtemessung von Seewasser ohne die Zwischenschaltung von natürlichem Referenzmaterial ermöglicht die direkte Anbindung an das SI und damit eine Vergleichbarkeit über sehr lange Zeiträume. (H. Schmidt, H. Wolf, FB 3.3, henning.wolf@ptb.de)

### **Referenzlabor für Ringvergleich Druck der Eichbehörden**

Im Auftrag des Arbeitsausschusses „Druck“ der Vollversammlung für das deutsche Mess- und Eichwesen betreute das Fachlabor *Druck* der PTB als Referenzlabor die Durchführung eines Ringvergleichs deutscher Eichbehörden im Überdruckbereich 0 bar bis 20 bar (pneumatisch) und 0 bar bis 200 bar (hydraulisch) vom Februar 2013 bis Juni 2015. Ziel des geplanten Vergleichs war die Überprüfung der Vergleichbarkeit / Untersuchung der Einheitlichkeit der Eichungen in Deutschland und ihre Rückführbarkeit in den oben genannten Druckbereichen. Die PTB Braunschweig fungierte als Referenzlabor, übernahm die Betreuung dieses Ringvergleiches, einschließlich der Erstellung des technischen Protokolls und der Zusammenfassung aller Ergebnisse. Außerdem war sie für Auswahl, Beschaffung und

Untersuchung des TransfERNormals zuständig. Es nahmen 13 Eichdirektionen mit insgesamt 14 Eichämtern teil. Der Ringvergleich wurde zu einem guten Abschluss gebracht. (J. Koenemann, H. Ahrendt, FB 3.3, jens.koenemann@ptb.de)

### **Detonationen in Kapillarrohren mit Stickstoffoxid als Oxidator**

Immer häufiger werden großtechnische Synthesen in mikrostrukturierten Anlagen mit Kapillarrohren durchgeführt, die einen Durchmesser von weniger als 1 mm aufweisen. Dies ist von großem Nutzen, wenn Prozesse mit Oxidationsmitteln wie O<sub>2</sub>, NO und N<sub>2</sub>O durchgeführt werden. (E. Brandes, FB 3.7, elisabeth.brandes@ptb.de)

### **Explosionskenngrößen von Methanol-Luft-Gemischen**

Die Bewertung von Methanol als Alternativkraftstoff erfordert u. a. systematische Untersuchungen der sicherheitstechnischen Kenngrößen von Methanol-/Luft-Gemischen unter den verschiedensten Bedingungen. (E. Brandes, FB 3.7, elisabeth.brandes@ptb.de)

### **Explosionsbereiche von Propan-, Isopropanol-, Aceton- und Methylacetat-Luft-Gemischen**

Explosionsbereiche von Propan-, Isopropanol-, Aceton- und Methylacetat-Luft-Gemischen wurden in Gegenwart von Stickstoff, Argon, Helium und Kohlendioxid nach EN1839-Methode T bestimmt sowie rechnerisch modelliert. (E. Brandes, FB 3.7, elisabeth.brandes@ptb.de)

### **Sicherheitstechnische Kenngrößen von Gasen und Dämpfen bei nichtatmosphärischen Bedingungen**

Mittels Literaturrecherche wurde bewertet, inwieweit für die sicherheitstechnischen Kenngrößen von Gasen/Dämpfen und Flüssigkeiten Verfahren vorhanden sind oder abgeleitet werden können, die es erlauben, Kenngrößen für nichtatmosphärische Bedingungen verlässlich abzuschätzen, wenn man von den mit genormten Bestimmungsverfahren bei Umgebungsbedingungen bestimmten Werten ausgeht. (E. Brandes, FB 3.7, elisabeth.brandes@ptb.de)

### **Brennbare Flüssigkeiten im Spiegel der Rechtsverordnungen - Was ändert sich mit der Novelle der Betriebssicherheitsverordnung im Jahr 2015**

Im Januar 2015 beschloss die Bundesregierung eine Neufassung der Betriebssicherheitsverordnung sowie eine Änderung der Gefahrstoffverordnung. Diese Novelle wurde vom Bundesministerium für Arbeit und Soziales erarbeitet, und ihr wurde so-

wohl vom Bundeskabinett als auch vom Bundesrat zugestimmt. In Artikel 3 dieser Novelle ist festgelegt, dass diese Änderungen zum 1.6.2015 in Kraft treten, wobei keinerlei Übergangsbestimmungen festgelegt worden sind. (D.-H. Frobese, FB 3.7, dirkhans.frobese@ptb.de)

### **Abschluss des Forschungsvorhabens zur Untersuchung der Zündwirksamkeit von mechanischen Funken beim Einsatz von Bronze**

Im Forschungsvorhaben wurde das Auftreten und die Wirksamkeit der in Reibprozessen mit Bronzelegierungen auftretenden Zündquellen „heiße Oberfläche“ und „mechanische Funken“ bewertet. Dazu wurden Untersuchungen durchgeführt, bei denen die Zündquellenentstehung in Form von Temperaturentwicklung und das Auftreten von mechanischen Funken betrachtet wurde. Weiterführend wurde die Zündwirksamkeit in ausgewählten explosionsfähigen Gas-Luft-Gemischen untersucht. Das Forschungsvorhaben konnte damit erfolgreich abgeschlossen werden. (L. Meyer, FB 3.7, lennart.meyer@ptb.de)

### **Vergleich der Zündquellenentstehung bei kontinuierlicher und repetierender Reibung**

In metallischen Reibsituationen kann es zur Ausbildung der Zündquellen „heiße Oberfläche“ und „mechanisch erzeugte Funken“ kommen. Neben der bereits untersuchten kontinuierlichen Reibung stand hier die Zündquellenentstehung bei repetierender Reibung im Fokus, wie sie in Ventilatoren oder Rührwerken auftreten kann. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass trotz einer verringerten Temperaturentwicklung die Zündwirksamkeit gegenüber explosionsfähigen Gas-Atmosphären annähernd gleich ist. (L. Meyer, FB 3.7, lennart.meyer@ptb.de)

### **Vermeidung elektrostatischer Aufladungen von Fliesen für Gewerbefußböden**

In Bereichen, bei denen keine explosionsfähige Atmosphäre vorliegt, werden an Fliesen für Gewerbebetriebe keine elektrostatischen Anforderungen gestellt. Seit einigen Monaten sind jedoch bei Personen gelegentlich heftige elektrische Schläge beim Betreten bestimmter Bodenfliesen mit einem Metallwagen aufgetreten. Im Rahmen eines Forschungsvorhabens wurde deshalb eine experimentelle Untersuchung dieses Phänomens vor Ort durchgeführt. (U. von Pidoll, FB 3.7, ulrich.v.pidoll@ptb.de)

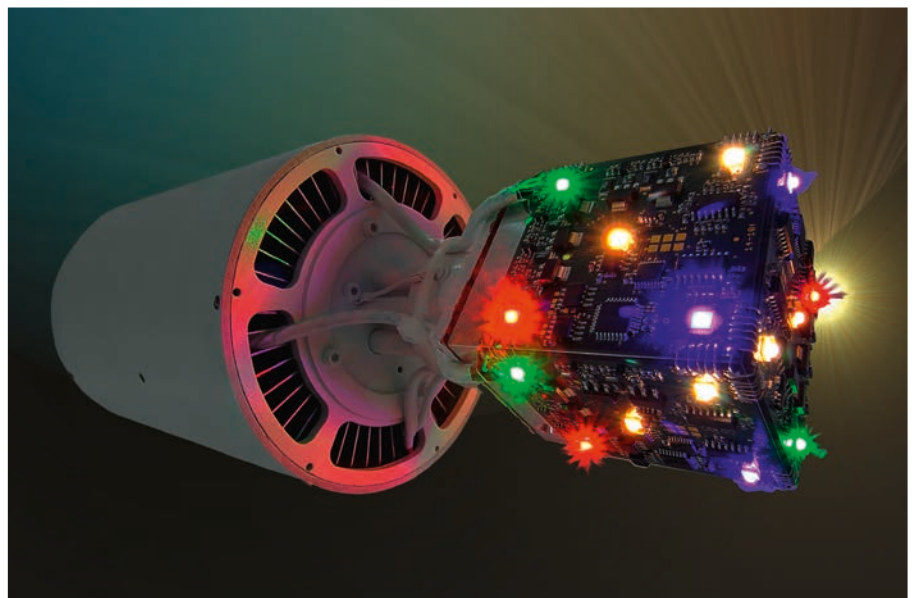
### **Vermeidung von Explosionen beim Verarbeiten von Ethylacetat**

Es ist seit Jahren bekannt, dass bei der Handhabung von wassermischbaren brennbaren Flüssigkeiten praktisch nur Unfälle mit Ethylacetat, tertiär-Butylacetat sowie Propylacetat auftreten. In einem Forschungsvorhaben wurden die Gründe hierfür untersucht und festgestellt. (U. von Pidoll, FB 3.7, ulrich.v.pidoll@ptb.de)





# Abteilung 4 Optik



Die Aufgaben der Abteilung *Optik* sind hauptsächlich den drei Themenbereichen *Photometrie und Radiometrie, Länge und dimensionelle Metrologie* und *Zeit und Frequenz* zuzuordnen.

## Radiometrie und Photometrie

Im Themenbereich *Radiometrie und Photometrie* der Abteilung *Optik* soll hier über drei Schwerpunkte berichtet werden: die metrologische Bestimmung von physikalischen Größen zur Umweltüberwachung, die Neubestimmung der Basiseinheit Candela und die metrologische Charakterisierung von Solarzellen.

Klima- und Umweltbeobachtung und -forschung stellen neue Herausforderungen an die Metrologie der Strahlung der Sonne. Im Auftrag der World Meteorological Organization (WMO) besitzt das Physikalisch-Meteorologische Observatorium Davos (PMOD) die Funktion des Weltstrahlungszentrums (World Radiation Center: WRC) und betreibt eine Strahlungsmessstandardgruppe, die aus sechs präzisen Gesamtstrahlungs-Radiometern (Pyrheliometer) besteht. Damit die weltweiten Regionalzentren ihre Geräte nach dieser radiometrischen Referenz kalibrieren können, finden alle fünf Jahre am PMOD/WRC internationale Pyrheliometer-Vergleiche (IPC) statt. Auf der anderen Seite gibt es eine World Photovoltaic Scale (WPVS) z. B. für die Solarzellenmetrologie, die maßgeblich von der PTB betreut wird und die auf das Internationale Einheitensystem (SI) zurückgeführt ist. Die immer kleineren Unsicherheiten bei der Realisierung beider Skalen machen es erforderlich, beide Skalen besser als bisher miteinander zu vergleichen. Daher hat die PTB im Jahr 2015 mit ihren Gesamtstrahlungsradiometern am 12. Vergleich (IPC XII) teilgenommen (s. Bild 1). Der Bericht über den Vergleich wird im Frühjahr 2016 erwartet, der dann auch Auskunft über die Vergleichbarkeit beider Skalen geben wird.

Die Photovoltaik (PV) ist ein weltweiter Wachstumsmarkt, in dem deutsche Unternehmen einen hohen Anteil von Kalibrierdienstleistungen erbringen sowie einen wesentlichen Anteil an der Messgeräteproduktion halten. Metrologische Herausforderungen ergeben sich bei der Bestimmung der Effizienz großflächiger PV-Module und unterschiedlicher, sich dynamisch entwickelnder PV-Technologien. Hierzu sind rückgeführte Messungen der spektral- und winkelaufgelösten Sonnenein-

strahlung erforderlich. Die über die gesamte Lebensdauer eines PV-Moduls erzeugte elektrische Energie für einen bestimmten Standort ist für Investitionsentscheidungen eine wichtige Kenngröße, die metrologisch fundiert ermittelt werden muss. Für die Optimierung von PV-Modulen sind rückgeführte Messungen einer Vielzahl struktureller, optischer und elektrischer Materialparameter erforderlich. Um der stetig steigenden Zahl der Kundenanfragen nachkommen zu können, ist ein automatisierter Messplatz zur rückgeführten Kalibrierung der Strom-Spannungskennlinien von Referenzsolarzellen entwickelt und aufgebaut worden (s. Bild 2). Nach eingehender Charakterisierung wurde dieser Messplatz im Sommer 2015 erfolgreich für Kalibrierungen nach IEC-Norm 60891 auditiert und kann nun im regulären Betrieb eingesetzt werden. Damit werden relative Messunsicherheiten deutlich kleiner als 0,5 % bei WPVS-Referenzsolarzellen unter Standard-Testbedingungen erreicht. Durch die Etablierung dieser Messmethode an der PTB wird es zukünftig möglich sein, die Effizienz von Hochleistungssolarzellen zu bestimmen und diese mit kleiner Messunsicherheit an die Kunden weiterzugeben.

Obwohl der Markt der Solarzellen heute von Silizium-Technologien dominiert wird, wird zur Kostenreduktion, Effizienzsteigerung und für neue Anwendungsmöglichkeiten intensiv an Solarzellen auf Basis von organischen Verbindungen geforscht. Um die Einflüsse der Umgebungsbedingungen auf die unterschiedlichen Typen von Solarzellen zu untersuchen und quantitativ zu vergleichen, wurde an der PTB ein Laser-basierter Differential Spectral Responsivity (DSR)-Messplatz entwickelt. Der Vergleich zwischen organischen und Si-Referenzzellen



Bild 1: PTB-Mitarbeiter Dirk Friedrich mit verschiedenen Detektoren der PTB, die die Sonnen- und Himmelsstrahlung messen, beim weltweiten Pyrheliometer-Vergleich im Physikalisch-Metrologischen Observatorium Davos (PMOD)

Titelbild:

An der PTB neu entwickeltes Leuchtdioden-Transfornormal

Bild 2: Solarzelle am Kennlinienmessplatz unter simuliertem Sonnenlicht mittels farbiger Leuchtdioden



zeigt, dass der Wirkungsgrad der organischen Solarzelle mit zunehmender Bestrahlungsstärke sinkt und mit zunehmender Temperatur steigt, während die Si-Solarzelle ein gegensätzliches Verhalten aufweist. Da in der Praxis i. A. sehr unterschiedliche Umgebungsbedingungen vorliegen können, unterstreichen diese Ergebnisse die Relevanz einer umfangreichen Charakterisierung und Kalibrierung von Solarzellen.

Mit der Umstellung von Glühlampen auf energieeffizientere Lichtquellen hat die Bedeutung der SI-Basiseinheit Candela als Maß für die Wirkung von Licht stark zugenommen. Die Bewahrung und Weitergabe der Einheit geschieht hierbei in der PTB mithilfe von Lichtstärkenormallampen mit sehr

kleinen Unsicherheiten. Als abgeleitete Einheit ist ihre Realisierung in der PTB von detektorgestützten Verfahren abhängig, die eine Brücke zwischen spektralen Messungen und den integralen Eigenschaften von Licht schlagen müssen.

Die derzeitige Weitergabe der Einheit Candela basiert auf einer früheren Realisierung, die noch heute durch eine Gruppe von 17 Lampen bewahrt wird. Um diese auf Artefakten basierende Bewahrung mittelfristig durch eine metrologisch adäquate Realisierung zu ersetzen, will die PTB eine neue detektorgestützte Rückführung aufbauen, deren Unsicherheit in der Größenordnung der derzeit bewahrten Einheit liegt. Dazu wurde ein Prototyp eines neuartigen  $V(\lambda)$ -Trapdetektors mit integrierter Monitortechnik entwickelt, mit dem über eine deutlich verkürzte Kalibrierkette die Rückführung der Lichtstärke auf die radiometrische optische Strahlungsleistung realisiert werden soll (s. Bild 3).

### Länge und dimensionelle Metrologie

In der Abteilung *Optik* wird der Themenbereich *Länge und dimensionelle Metrologie* in den Fachbereichen *Bild und Wellenoptik* und *Quantenoptik und Längeneinheit* bearbeitet. Die PTB hat als einen Schwerpunkt in der Nanometrologie die Charakterisierung nanostrukturierter Oberflächen identifiziert. Diese kommen schon heute in verschiedensten Anwendungsfeldern zum Einsatz, zum Beispiel in der Nanoelektronik, Optik, Sensorik und Biotechnologie. Weitere zukünftige Anwendungen, insbesondere im Bereich der diffraktiven Optiken sowie – mittelfristig – bei neuartigen „künstlichen“ optischen Materialien (Metamaterialien) sind zu

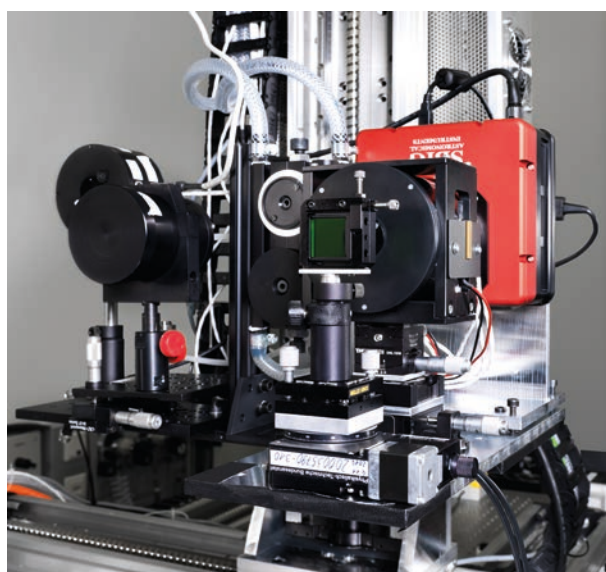


Bild 3: Aufbau zum Test der Komponenten des neuartigen  $V(\lambda)$ -Trap-Empfängers



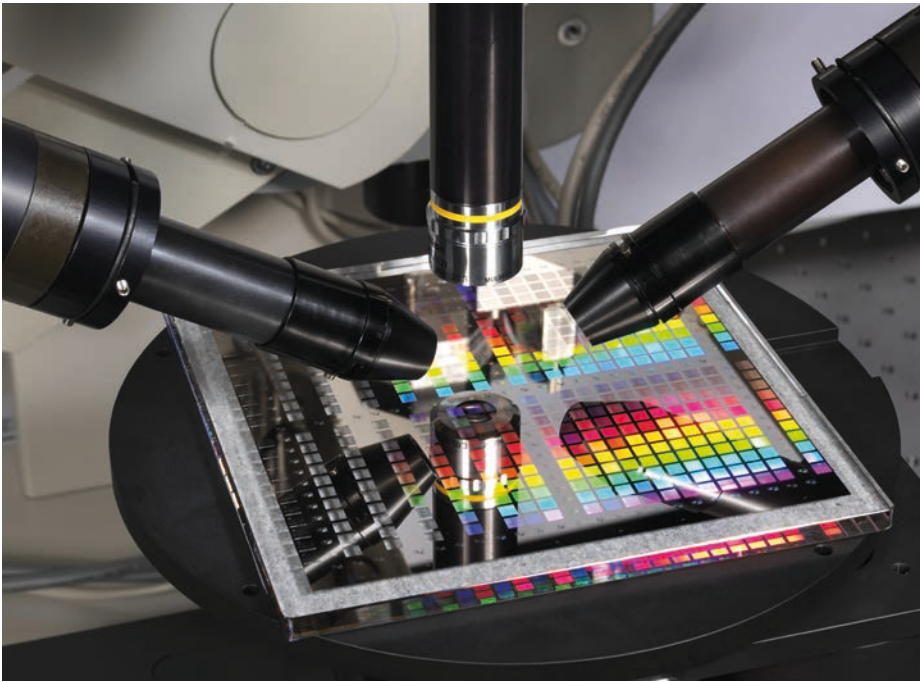


Bild 4: Ellipsometrie an strukturierten Oberflächen (Gitterstrukturen). Die Gitterperioden liegen zwischen 320 nm und 520 nm, sodass Beugungsfarben sichtbar werden.

erwarten. Diese Anwendungen benötigen immer besser werdende Möglichkeiten, Mikro- und Nanostrukturen gezielt herzustellen und metrologisch zu charakterisieren. Die erforderlichen Messunsicherheiten können nur durch Nutzung aller verfügbaren optischen Informationskanäle erreicht werden. Dazu gehört bei den sehr kleinen und komplexen Strukturen die komplette Polarisationsinformation, die zur Charakterisierung der Strukturform, Materialanisotropie oder Chiralität zwingend erforderlich ist. Die PTB nutzt jetzt die Polarimetrie regelmäßig (s. Bild 4) für ihre Untersuchungen.

Zur genauen Charakterisierung von Messgeräten, die in der Industrie zur Vermessung der Oberflächenform von Asphären eingesetzt werden, hat die PTB spezielle metrologische Vergleichsnormale entwickelt. Diese Normale unterscheiden sich von typischen Asphären, um wichtige Eigenschaften der Messgeräte wie die laterale Auflösung oder Abweichungen bei der Höhenmessung sensitiv testen zu können. Diese besonderen Referenzflächen wurden mit dem Tilted-Wave-Interferometer charakterisiert, das kürzlich in einer Zusammenarbeit mit der Firma Mahr und dem Institut für Technische Optik der Universität Stuttgart entwickelt und gemeinsam mit der PTB charakterisiert wurde (s. Bild 5).

Genauere Bestimmungen von Verschiebungen oder dimensionellen Größen makroskopischer Körper werden üblicherweise mit optischen Interferometern durchgeführt, die die gesuchten Größen über die Wellenlänge  $\lambda$  des verwendeten Lichts bestimmen, die ihrerseits von der sehr genau bestimm- baren Frequenz  $f$  der benutzten Laserstrahlung

durch  $\lambda = c/f$  für eine unendlich ausgedehnte ebene Welle abgeleitet wird.

Allerdings sind die Wellen in realen Interferometern nie unendlich ausgedehnt und auch nicht eben, was bei höchstgenauen Längenmessungen zu berücksichtigen ist. Dazu ist es notwendig, die optischen Wellenfronten hochgenau zu messen. In einem kürzlich abgeschlossenen, von der EU geförderten Forschungsprojekt wurde daher in der PTB ein Verfahren entwickelt, mit dem Wellenfrontensensoren absolut und hochgenau kalibriert werden können. Bei diesem ist eine Kenntnis über die Form der zur Kalibrierung verwendeten Wellenfront nicht mehr

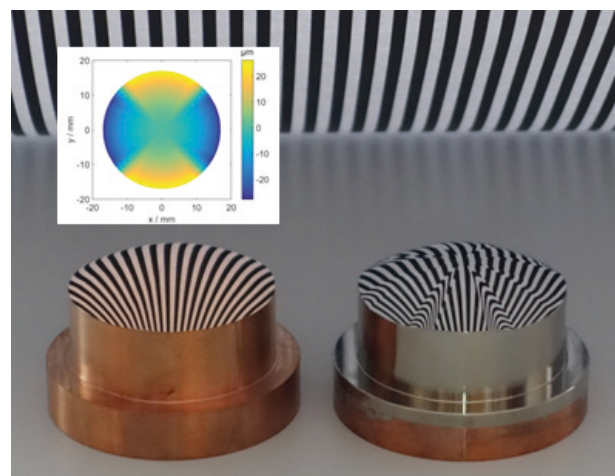


Bild 5: Referenzflächen für die Charakterisierung von optischen und taktilen Asphären- und Freiform-Messgeräten, hergestellt im wissenschaftlichen Gerätebau der PTB. Das Falschfarbenbild zeigt die Messungen am Tilted-Wave-Interferometer für die Oberfläche des linken Körpers, wobei eine Kugelfläche mit dem Radius 39,5 mm abgezogen wurde.



notwendig. Das neue Verfahren soll auch am kombinierten Röntgen-/Lichtinterferometer eingesetzt werden, mit dem die Gitterkonstante eines Siliziumkristalls für die genaue Bestimmung der Avogadrokonstante gemessen wird. Da diese Messung allerdings im Vakuum stattfindet, musste der Einfluss der Evakuierung auf die Wellenfront abgeschätzt werden. Dazu wurde ein Ab-Initio-Modell auf der Grundlage der Konstruktionsdaten der Kollimator-Optik aufgestellt und die daraus abgeleitete Korrektur mit geringer Unsicherheit berechnet.

## Zeit und Frequenz

Die verschiedenen Aufgaben im Themenbereich *Zeit und Frequenz* werden in den Fachbereichen *Zeit und Frequenz*, *Quantenoptik und Längeneinheit* und im *QUEST-Institut an der PTB* bearbeitet. Neben den vielfältigen laufenden Aufgaben zur Realisierung und Verbreitung der gesetzlichen Zeit in Deutschland und den maßgeblichen Beiträgen zum Internationalen Zeitsystem liegen zwei Forschungs- und Entwicklungsschwerpunkte gegenwärtig bei der Entwicklung optischer Uhren und bei neuen Methoden zur Frequenzübertragung. Bei den optischen Uhren, bei denen ein extrem schmaler Übergang in Atomen oder Ionen mit einem hochstabilen Laser abgefragt wird, ist die Kenntnis der Übergangsfrequenz in SI-Hertz mittlerweile im Wesentlichen durch die Unsicherheit der besten Caesiumuhren begrenzt. Hinsichtlich ihrer Instabilität und der Unsicherheit, die Frequenz des ungestörten optischen Übergangs zu realisieren, sind die optischen Uhren bereits heute den besten Caesiumuhren um jeweils etwa zwei Größenordnungen überlegen, was zu gegebener Zeit zu einer Neudefinition der Sekunde im

SI führen wird. Diese Entwicklung ist noch nicht abgeschlossen; so ist noch unklar, ob gespeicherte einzelne Ionen, die in einer elektromagnetischen Falle gehalten werden, oder ein Ensemble aus neutralen Atomen, die in einem Lichtfeld gespeichert sind, die besten Aussichten haben, als neue Referenz im SI zu dienen. Daher untersucht die PTB beide Ansätze und ist in beiden Fällen international sehr gut aufgestellt.

Die stetige Verbesserung der Uhren – sowohl der Caesiumuhren als auch der optischen Uhren – verlangt nach der Entwicklung neuer Methoden der Zeit- und Frequenzverteilung. Im Rahmen des Europäischen Metrology Research Programs (EMRP) wurden im Projekt International Time Scale with Optical Clocks (ITOC) in einer konzertierten Aktion optische und Mikrowellenuhren der wichtigsten europäischen metrologischen Institute NPL (Großbritannien), PTB, LNL-SYRTE (Frankreich), INRIM (Italien), und VTT-MIKES (Finnland) über Satelliten miteinander verglichen. Zur Erhöhung der Genauigkeit des Satellitenvergleichs wurde speziell die Bandbreite der Übertragung vergrößert. Eine weitere Erhöhung der Bandbreite bei der Mikrowellenübertragung wird im ACES-Projekt (Atomic Clock Ensemble in Space) der ESA erwartet, bei dem 2017 eine speziell für den Einsatz in der Schwerelosigkeit entwickelte Caesiumuhr und ein Wasserstoffmaser auf die internationale Raumstation (ISS) gebracht werden sollen. Mit deren Hilfe und mit neu entwickelten Mikrowellen- und optischen Verbindungen für die Zeitübertragung sollen die Uhren im All und an den Bodenstationen verglichen werden und verbesserte Experimente zur Gültigkeit der allgemeinen Relativitätstheorie durchgeführt



Bild 6: Die erste Mikrowellen-Bodenstation für das Projekt ACES (Atomic Clock Ensemble in Space) der ESA ist auf dem Dach des Meitner-Baus in der PTB aufgebaut. In der für 2017 geplanten Mission soll hochpräzise Zeit- und Frequenzübertragung zu einem Uhrenensemble auf der internationalen Raumstation ISS durchgeführt werden.



Bild 7: Gemeinsam mit der Europäischen Raumfahrtagentur ESA veranstaltete die PTB im Oktober 2015 das Kolloquium „Scientific and Fundamental Aspects of the Galileo Programme“

werden. Die PTB hat im November 2015 die erste Mikrowellen-Bodenstation erhalten (s. Bild 6), die für das wissenschaftliche Programm von ACES bis in das Jahr 2020 eingesetzt werden soll.

Die PTB ist auch maßgeblich beteiligt bei der Entwicklung und wissenschaftlichen Nutzung des Zeitsystems des europäischen globalen Satellitennavigationssystems Galileo (s. Bild 7).

Um das volle Potenzial der Stabilität optischer Uhren auszunutzen, sind neuartige Methoden optischer Frequenzübertragung notwendig, die über die bisherigen satellitengestützten Verfahren im Mikrowellenbereich hinausgehen. Dazu gehört die Entwicklung transportabler optischer Uhren (s. Bild 8), die für den Vergleich räumlich getrennter optischer Uhren und für das neu aufkommende Feld einer relativistischen Geodäsie benötigt werden. Die relativistische Geodäsie nutzt die Änderung der Frequenz von Uhren im Gravitationspotential der Erde zur Bestimmung des Geoids. Da an der Erdoberfläche schon ein Höhenunterschied von

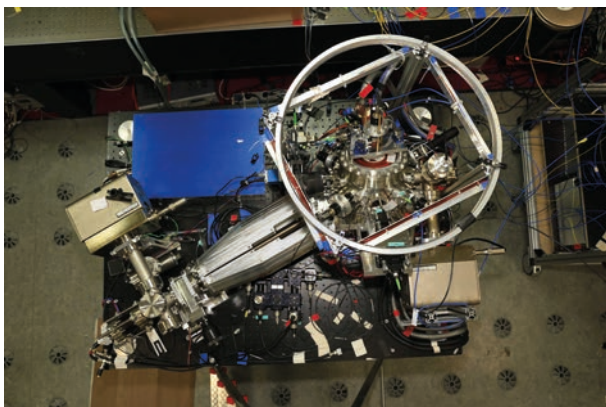


Bild 8: Transportable Strontium-Gitteruhr der PTB

einem Meter zu einer relativen Frequenzänderung von  $10^{-16}$  führt, sind mit den zukünftigen optischen Uhren auch neue Bestimmungen von Höhendifferenzen im Gravitationspotential der Erde mit Unsicherheiten im Bereich weniger cm möglich, sofern die Frequenz der beiden Uhren über eine Übertragungstrecke so genau verglichen werden kann.

Eine solche Methode stellt eine Verbindung zwischen den Uhren mit einer optischen Faser dar. Im Berichtsjahr wurde eine optische Faserverbindung zwischen PTB und LNE-SYRTE in Paris in Betrieb genommen (s. Nachrichten des Jahres) und damit die optischen Strontiumgitteruhren von PTB und SYRTE direkt verglichen. Eine solche Verbindung hat das Potenzial, Frequenzen mit relativen Unsicherheiten bis unter  $10^{-19}$  zu vergleichen.

Im QUEST-Institut an der PTB wurden im Berichtsjahr ebenfalls mehrere Durchbrüche erzielt. Es wurde eine neue Methode zur Zustandsdetektion entwickelt. Sie basiert auf laserinduzierten Kräften, die es erstmals erlauben, den internen Zustand eines Moleküls ohne inkohärente Streuung von Photonen und ohne Zerstörung des Moleküls auszulesen. Die neue Detektionsmethode hat das Potenzial, vielen grundlegenden Fragen der modernen Physik, wie der möglichen Variation von Naturkonstanten, der Existenz eines permanenten elektrischen Dipolmoments des Elektrons oder „anderer Physik“ jenseits des Standardmodells mit ausgesuchten kalten und gespeicherten Molekülen nachzugehen. Mit der hier kürzlich entwickelten Photonenrückstoßspektroskopie gelang es auch, die Isotopieverschiebung im Calciumion wesentlich genauer zu bestimmen und die Unsicherheiten, mit der die relative Feld- und die Massenverschiebungskonstante, sowie der mittlere



Bild 9: Postdoktorandin Chunyan Shi beim Justieren des Farbstofflasers, der für die nicht-destruktive Moleküldetektion an  $MgH^+$  eingesetzt wurde



quadratische Kernladungsradius des Calcium-Ions bekannt sind, wesentlich zu verbessern (s. Bild 9).

Im letzten Jahr wurde in einer Zusammenarbeit mit dem Max-Planck-Institut für Kernphysik und der Universität Aarhus erstmals die Kühlung und Speicherung hochgeladener  $Ar^{13+}$ -Ionen in einem Coulomb-Kristall aus gekühlten Berylliumionen demonstriert. Jetzt wird an der PTB ein Messplatz aufgebaut, mit dem mit hochgeladenen Ionen die Grundlagen für neue Atomuhren und hochpräzise Tests einer möglichen Änderung von Naturkonstanten mit Laserspektroskopie untersucht werden können (Bild 10).

Bei aktuellen optischen Ionenuhren stellt die Mikrobewegung einen signifikanten Beitrag im Unsicherheitsbudget in der Größenordnung von  $10^{-18}$  dar.

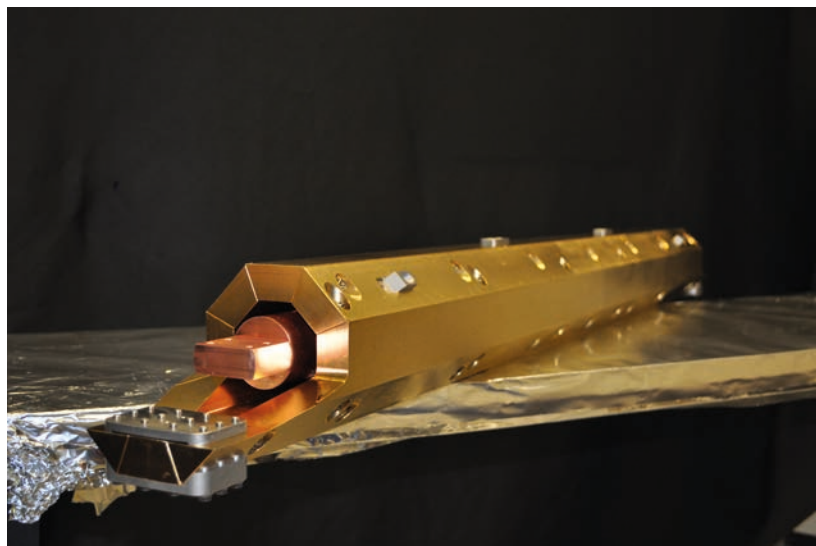


Bild 10: Herzstück des neuentwickelten vibrationsarmen kryogenen Aufbaus für die Untersuchung von hochgeladenen Ionen. Der innere Kupferstab stellt die 4-K- und das äußere Schild die 40-K-Wärmesenke dar.

Verschiedene Methoden zur genauen Bestimmung der Mikrobewegungsamplitude wurden experimentell untersucht und quantitativ verglichen. Für das Regime typischer Ionenfallen konnte gezeigt werden, dass eine relative Frequenzunsicherheit aufgrund der Mikrobewegung von wenigen  $10^{-20}$  erreicht werden kann.

In der Arbeitsgruppe von Prof. C. Ospelkaus (PTB und LUH) werden mikrostrukturierte Oberflächenfallen für Ionen entwickelt. In solchen Ionenfallen gespeicherte einzelne Atome könnten in einem Quantencomputer als Qubits (Quantenbits) dienen. Als wesentliche Voraussetzung für verschränkende Quantenlogik-Operationen wurden jetzt Übergänge zwischen den Bewegungsseitenbändern unter Verwendung von Mikrowellen-Nahfeldern implementiert.

## In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

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

### Grundlagen der Metrologie

#### Kalibrierstrategien für ein neuartiges Formmesssystem basierend auf einem Liniensensor

Im Rahmen eines DFG-Projektes (LE 992/7-1, EH 400/4-1) wurde in einer Kooperation zwischen dem Fachgebiet Messtechnik der Universität Kassel und der Arbeitsgruppe *Form- und Wellenfrontmetrologie* der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt ein interferometrischer Zeilensensor in Kombination mit einem 5-Achsen-Bewegungssystem zur Messung der Form optischer Flächen aufgebaut. Für die Nachführung des Zeilensensors wird der genaue Abstand zwischen Sensor und Prüfling benötigt. Dafür wurde eine Kalibrierstrategie entwickelt. Damit sind jetzt Messungen der kompletten 3D-Form auch für stärker gekrümmte Oberflächen möglich. (S. Laubach, FB 4.2, [soeren.laubach@ptb.de](mailto:soeren.laubach@ptb.de))

#### Berechnung des interferentiellen Längenfehlers durch Wellenfrontsimulation von Faserkollimatoren

Für die akkurate Berechnung des durch Beugung verursachten Längenfehlers in der Laserinterferometrie ist eine genaue Charakterisierung der verwendeten Laserstrahlen erforderlich. Für die Messungen im Avogadroprojekt der PTB wird ein kalibrierter Wellenfrontsensor verwendet. Da dieser nur an Luft arbeitet, die Wellenfronten aber für Experimente im Vakuum bekannt sein müssen, wurde ein Ab-Initio-Modell der verwendeten Komponenten, einer Stufenindexglasfaser mit Faserkollimator, unter Verwendung eines strahlenbasierten Beugungsintegrals aufgestellt. Mit diesem Modell kann der Einfluss der Evakuierung berechnet werden. Durch eine Monte-Carlo-Simulation konnte die Größe des zu erwartenden relativen interferentiellen Längenfehlers und der daraus abgeleiteten Korrektur mit einer relativen Unsicherheit  $< 10\%$  berechnet werden. (U. Kuetgens, FB 4.3, [ulrich.kuetgens@ptb.de](mailto:ulrich.kuetgens@ptb.de))

#### Verbesserte Atomstrahlquelle für die Fontänenuhr CSF2

Bei Fontänenuhren führt eine erhöhte Frequenzstabilität zu kleineren Unsicherheiten bei Messungen für die Steuerung der internationalen Atomzeit und der gesetzlichen Zeit in Deutschland sowie bei Vergleichen mit optischen Uhren. Durch neue Lademethoden wurde die Zahl der Caesiumatome in der Fontänenuhr CSF2 so weit erhöht, dass nun eine

relative Messauflösung von  $3 \cdot 10^{-16}$  innerhalb eines Tages erreicht wird. (V. Gerginov, FB 4.4, [vladislav.gerginov@ptb.de](mailto:vladislav.gerginov@ptb.de))

#### Reduzierung von Phasenfluktuationen beim Abfragesignal von Fontänenuhren und optischen Uhren

Für Untersuchungen der Phasenstabilität des Mikrowellen-Abfragesignals der Fontänenuhren CSF1 und CSF2 wurde ein Phasentransientenanalysator entwickelt. Mit diesem kann ausgeschlossen werden, dass durch periodisch auftretende Phasenfluktuationen relative Frequenzverschiebungen von mehr als  $3 \cdot 10^{-17}$  verursacht werden. Der Analysator kann auch für Untersuchungen an optischen Uhren eingesetzt werden. (M. Kazda, FB 4.4, [michael.kazda@ptb.de](mailto:michael.kazda@ptb.de))

#### Ein Uhrenlasersystem basierend auf einem 48 cm langen Glasresonator

Ein Lasersystem wurde entwickelt, das zur Abfrage der Strontiumgitteruhr der PTB eingesetzt wird. Es nutzt einen 48 cm langen Glasresonator, bei dem die Frequenzstabilität des Lichtes durch dessen Längensstabilität bestimmt wird. Durch die hohe Länge kann der Einfluss der Brownschen Fluktuationen – des sogenannten thermischen Rauschens – der Spiegel reduziert werden. Somit werden Längen- und damit Frequenzstabilitäten erreicht, welche ansonsten nur mit aufwendigen, bei kryogenen Temperaturen betriebenen kristallinen Resonatoren möglich sind. Mit dem neuen ultrastabilen Lasersystem wurde in der PTB eine minimale Instabilität von  $\sigma_y = 8 \cdot 10^{-17}$  erreicht, was weltweit eine Spitzenstellung darstellt. (Sebastian Häfner, FB 4.3, [sebastian.haefner@ptb.de](mailto:sebastian.haefner@ptb.de))

#### Strontium-Gitteruhr erreicht Rekordinstabilität

Optische Gitteruhren erlauben es, extrem frequenzstabile Laserstrahlung zu erzeugen. Die Stabilität wird durch fundamentale und technische Rauschprozesse begrenzt. Deren genaue Analyse ergab, dass die Strontium-Gitteruhr eine ausgezeichnete Instabilität von  $1,6 \cdot 10^{-16}/(\tau/s)^{1/2}$  erreicht, sodass Messungen mit einer relativen Auflösung von  $10^{-17}$  in wenigen 100 s möglich werden. (Ch. Lisdat, FB 4.3, [christian.lisdat@ptb.de](mailto:christian.lisdat@ptb.de))



### Gewichtete Mittelwertbildung minimaler Unsicherheit

Besonders bei Frequenzmessungen werden ver- rauschte, zeitlich korrelierte Messdaten gemittelt, um eine möglichst geringe Unsicherheit zu erreichen. Es wurde untersucht, welche Gewichtung der Daten unter gegebenen typischen Rauschbedingungen die jeweils geringste Unsicherheit des gewichteten Frequenzmittelwerts liefert und wie diese Unsicherheit aus der Instabilität der Daten bestimmt werden kann. (E. Benkler, FB 4.3, erik.benkler@ptb.de)

### Prototyp der optischen Weltraumuhr zur Evaluierung an der PTB

Das „Space Optical Clocks 2“-Projekt (SOC2) ist ein von der EU gefördertes Projekt, das von der Heinrich Heine Universität Düsseldorf (HHUD) koordiniert und jetzt in der Endphase an der PTB evaluiert wird. Mit technologischen Beiträgen von 16 Kooperationspartnern aus Europa zielt das Projekt darauf ab, eine transportable optische Strontiumgitteruhr als Prototyp für eine Mission an Bord der Internationalen Raumstation ISS zu entwickeln. Langfristig soll eine Genauigkeit erzielt werden, die eine Größenordnung über der für die zukünftige ACES-Mission genutzten Mikrowellenuhr liegt. (Ch. Lisdat, FB 4.3, christian.lisdat@ptb.de)

### Nichtlinearer Zeeman-Effekt bei ultrakalten Calcium-Molekülen

Mit Hilfe hochauflösender Spektren in ultrakalten Calcium-Molekülen wurden in der PTB die Wechselwirkungspotentiale zwischen Calcium-Atomen genau bestimmt. In einer Kooperation mit Prof. Tiemann, Leibniz Universität Hannover, konnte daraus der nichtlineare Zeeman-Effekt in diesen schwach gebundenen Systemen modelliert werden und dieser Einfluss bei früheren Messungen korrigiert werden. (U. Sterr, FB 4.3, uwe.sterr@ptb.de)

### Neues Qubit in Mikro-Ionenfalle

In der Arbeitsgruppe von C. Ospelkaus (QUEST Institut an der PTB und LUH) wurde ein neues feldunabhängiges Zustandspaar von  $^9\text{Be}^+$ -Ionen demonstriert, welches sich besonders als langlebiges Qubit für die Mikrowellen-Quantenlogik mit gespeicherten Ionen eignet. Weiterhin wurde das Mikrowellenfeld eines zur Manipulation der Ionen in die Fallenstruktur integrierten Wellenleiters vermessen und mit numerischen Simulationen verglichen. Schließlich gelang es, mithilfe des Wellenleiters Bewegungs-Seitenbandübergänge für einzelne Ionen als wesentliche Voraussetzung für verschränkende Operationen mit mehreren Qubits zu

zeigen. (M. Wahnschaffe, H. Hahn, G. Zarantonello, A. Bautista-Salvador und M. Kohnen, QUEST, christian.ospelkaus@ptb.de)

### Bestimmung der Zeitdilatation aufgrund von Mikrobewegung in optischen Ionen-Uhren auf 20 Nachkommastellen

Am QUEST-Institut an der PTB wurden verschiedene Methoden zur Messung der Mikrobewegung von Ionen experimentell untersucht und quantitativ verglichen. Diese führt in optischen Ionenuhren zu einer relativistischen Frequenzverschiebung aufgrund der Zeitdilatation. Es wurden neue Modelle entwickelt und verifiziert, die nun eine relative Frequenzunsicherheit aufgrund der Mikrobewegung von wenigen  $10^{-20}$  erlauben. (J. Keller und T. E. Mehlstäubler, QUEST, jonas.keller@ptb.de, tanja.mehlstaebler@ptb.de)

### Präzisionsmessungen der Isotopieverschiebung in Calcium-Ionen

Forschern am QUEST-Institut an der PTB ist es gelungen, durch Photonenrückstoßspektroskopie Isotopieverschiebungen auf den  $^2\text{S}_{1/2} \rightarrow ^2\text{P}_{1/2}$ ,  $^2\text{S}_{1/2} \rightarrow ^2\text{P}_{3/2}$  und  $^2\text{D}_{3/2} \rightarrow ^2\text{P}_{1/2}$ -Übergängen in Calcium-Ionen mit einer kombinierten Unsicherheit von unter 100 kHz zu messen. Zum ersten Mal konnte der Unterschied in der Isotopieverschiebung zwischen der D1- und der D2-Linie der Calcium-Ionen aufgelöst werden. Des Weiteren wurden die Unsicherheiten sowohl der relativen Feld- und der Massenverschiebungskonstante als auch der mittlere quadratische Kernladungsradius des Calcium-Ions verbessert. (C. Shi, QUEST, chunyan.shi@ptb.de)

### Spektroskopische Identifikation der Niveauüberschneidung in $\text{Ir}^{17+}$

In einer Kollaboration mit dem Max-Planck-Institut für Kernphysik in Heidelberg und mehreren Theorie-Gruppen ist es QUEST-Forschern gelungen, die vorhergesagte Niveauüberschneidung in  $\text{Ir}^{17+}$  zu identifizieren. Dazu wurden optische Spektren von isoelektronischen hochgeladenen Ionen aufgenommen und eine Skalierung der Übergangsfrequenzen mit der Kernladungszahl bestimmt. Eine detaillierte, durch Ab-Initio-Atomstrukturrechnungen gestützte Analyse der Daten führte zur Identifizierung der Mehrzahl der Linien. Bisher nur theoretisch vorhergesagte optische Übergänge wurden entdeckt, die eine besonders hohe Empfindlichkeit auf eine mögliche Änderung der Feinstrukturkonstante haben. (Piet O. Schmidt, QUEST, piet.schmidt@ptb.de)

## **Neue Detektionsmethode für Hochpräzisions-spektroskopie von Molekül-Ionen**

Methoden für die Spektroskopie von atomaren Ionen, wie sie beispielsweise in optischen Atomuhren Verwendung finden, lassen sich im Allgemeinen nicht auf molekulare Systeme übertragen. Dies ist insbesondere für die Zustandsdetektion und -präparation der Fall. Am QUEST-Institut an der PTB wurde eine neue Methode zur Zustandsdetektion entwickelt. Sie basiert auf laserinduzierten Kräften, die es erstmals erlauben, den internen Zustand eines Moleküls ohne inkohärente Streuung von Photonen und ohne Zerstörung des Moleküls auszulesen. (Fabian Wolf, QUEST, fabian.wolf@ptb.de)

## **Langzeit-stabiler Laser für die Spektroskopie an $\text{Ar}^{13+}$**

Am QUEST-Institut an der PTB wurde ein langzeit-stabiler Laser bei 441 nm basierend auf einem frequenzverdoppelten Ti:Sa-Laser für die Spektroskopie an  $\text{Ar}^{13+}$ -Ionen aufgebaut. Mittels eines Transfer-Resonators wurde die Stabilität eines Rubidium-stabilisierten Lasers auf den Ti:Sa-Laser übertragen und damit die Schwankungen der Absolutfrequenz über mehrere Tage auf weniger als 100 kHz reduziert. (Tobias Leopold, QUEST, tobias.leopold@ptb.de)

## **Direkte Phasenstabilisierung mit hoher Bandbreite von Lasern unterschiedlicher Wellenlänge**

Im Zuge der Entwicklung eines auf Aluminium basierenden Frequenznormals wurde eine neue Methode zur schnellen Phasenstabilisierung von freilaufenden Diodenlasern unterschiedlicher Wellenlängen auf eine ultrastabile optische Referenz mittels eines Frequenzkamms realisiert. Durch Subtraktion des Eigenrauschens des Frequenzkamms konnte das Phasenrauschen des so stabilisierten Diodenlasers bis zu einer Bandbreite von 180 kHz unterdrückt werden, ohne dass dieser durch einen optischen Resonator vorstabilisiert war. (Nils Scharnhorst, QUEST, nils.scharnhorst@ptb.de)

## **Metrologie für die Wirtschaft**

### **Charakterisierung von Einzelphotonenlichtquellen auf Basis von NV-Farbzentren in Nanodiamanten**

Einzelphotonenlichtquellen spielen in den aktuellen optischen Quantentechnologien wie z. B. Quantenkommunikation, Quantencomputing und Quantenradiometrie eine zunehmend bedeutendere Rolle. Der Erfolg dieser Quantentechnologien hängt hauptsächlich von der Deterministik und Effizienz der Einzelphotonenquellen ab. Einzelphotonenquellen

mit höchster Photonenemissionsrate und kleinstem  $g^2(0)$ -Wert sind hierbei erforderlich. Daher werden im Rahmen des europäischen EMRP-Forschungsprojektes „Single-photon sources for quantum technologies“ (SIQUTE) hocheffiziente Einzelphotonenquellen auf Basis von Stickstofffehlstellen(NV)- und Siliziumfehlstellen(SiV)-Farbzentren in Nanodiamanten realisiert und charakterisiert. Hierbei werden die Einzelphotonenemitter bzw. NV- oder SiV-Farbzentren in eine dielektrische Antennenstruktur eingefügt, die zusammen mit der Verwendung eines Mikroskop-Objektivs mit hoher numerischer Apertur eine hocheffiziente Photonensammlung ermöglichen. Die bisher gemessene Photonenrate an solchen Einzelphotonenquellen liegt bei ca. einer Million Photonen/s und  $g^2(0) \sim 0,3$ . (M. López, FB 4.1, marco.lopez@ptb.de)

### **Neuer Messplatz zur rückgeführten Kalibrierung der Strom-Spannungskennlinie von Referenzsolarzellen**

In der PTB wurde ein neuer Messplatz zur rückgeführten Kalibrierung der Kennlinien von Referenzsolarzellen verwirklicht. Nach der Auditierung im Sommer 2015 kann dieser nun auch für Kundenkalibrierungen eingesetzt werden. In Kombination mit dem über eine differentielle spektrale Empfindlichkeitskalibrierung bestimmten Kurzschlussstrom ist es nun möglich, Parameter wie Leerlaufspannung und Füllfaktor mit niedrigster Messunsicherheit unter Standard-Testbedingungen zu ermitteln. (F. Witt, FB 4.1, florian.witt@ptb.de)

### **Erster LED Multiple Transfer Standard in Betrieb genommen**

Traditionell weisen klassische photometrische Transfernormale regelmäßig nur *eine* wesentliche Eigenschaft, ergänzt durch eine weitere, meist nachrangige Eigenschaft, auf. Beispielsweise übertragen Glühlampen als Lichtstrom- oder Lichtstärkennormal entsprechend ihrer Bauart jeweils nur eine Einheit (hier Lumen bzw. Candela) gepaart z. B. mit ihrer Verteilungstemperatur. Sehr selten transferiert ein derartiges Normal bauartbedingt beide Einheiten gleichzeitig. Es wurden jetzt LED-Transfernormale entwickelt, die diese und weitere unterschiedliche Einheiten und Eigenschaften gleichzeitig zur Verfügung stellen. (M. Lindemann, FB 4.1, matthias.lindemann@ptb.de)

### **Effiziente optische Charakterisierung von Effektpigmentlackierungen**

Lackierungen, die Interferenzpigmente enthalten, zeigen einen winkelabhängigen Farbeindruck. Dies macht eine umfassende Farbcharakterisierung aufwendig. Neu vorgeschlagene Messgeometrien gestatten durch Ausnutzung von Symmetrien und mithilfe eines physikalischen Modells die Beschreibung und Vorhersage der winkelabhängigen Farbe mit nur wenigen Messpunkten. (C. Strothkämper, FB 4.2, christian.strothkaemper@ptb.de)

### **Verfahren zur absoluten Kalibrierung von Wellenfrontsensoren**

Im Rahmen eines EMRP-Projektes (SIB08) wurde ein Verfahren zur absoluten Kalibrierung von Wellenfrontsensoren entwickelt, bei dem die Kenntnis der Form der Referenzwellenfront nicht mehr notwendig ist. Die Kalibrierung basiert auf einem erweiterten Stitching-Verfahren, das auch Defokus- und Astigmatismusfehler des Sensors erfasst. Das Verfahren ermöglicht neben der Bestimmung des systematischen Sensorfehlers auch die Bestimmung der Form der Referenzwelle. Für einen temperaturstabilisierten Wellenfrontsensor ergab sich für den systematischen Sensorfehler eine Unsicherheit von 7 nm ( $k = 2$ ) entsprechend  $\lambda/70$ , bei einer Sensorfläche von 12,5 mm im Durchmesser. (S. Quabis, FB 4.2, susanne.quabis@ptb.de)

### **Verbesserte optische Vermessung der Breite von Mikrostrukturen**

Es wurde ein verbessertes Verfahren zur mikroskopischen Vermessung von Mikrostrukturen entwickelt, das bisherige Nachteile z. B. durch eine ungenaue Fokussierung vermeidet. Dazu werden mehrere Bildprofile mit jeweils leicht unterschiedlicher Fokussierung (um den besten Fokus herum) aufgezeichnet. Dabei werden die aufgezeichneten Bildprofile durch rigoros berechnete Profile angepasst, wobei auch etwaige Fehlfokussierungen bestimmt werden. Das Verfahren führt zu einer Reduzierung sowie einer besseren Quantifizierung der Messunsicherheit. (M. Wurm, D. Bergmann, FB 4.2, matthias.wurm@ptb.de)

### **Metrologie für die Gesellschaft**

#### **Charakterisierung und Kalibrierung von organischen Solarzellen**

Um die Einflüsse der Umgebungsbedingungen auf die unterschiedliche Typen von Solarzellen zu untersuchen, wurden zwei organische Solarzellen auf Basis kleiner Moleküle, eine Farbstoffsolarzel-

le sowie Silizium-Solarzellen charakterisiert und kalibriert. Die Untersuchungen ergaben, dass die unterschiedlichen Technologien unterschiedliche spektrale Empfindlichkeiten, Temperatur- und Bestrahlungsstärkekoeffizienten der Wirkungsgrade aufweisen. Für eine gute Vergleichbarkeit unterschiedlicher Solarzellen-Technologien ist daher eine umfangreichen Charakterisierung und Kalibrierung von Solarzellen unumgänglich. (T. Fey, FB 4.1, thomas.fey@PTB.de)

#### **Charakterisierung der Referenzgeräte für die Messungen der Gesamtozonsäule in der Atmosphäre**

Für die Bestimmung der Gesamtozonsäule in der Atmosphäre werden traditionell Geräte zweier Typen eingesetzt: die sogenannten Dobson- und Brewer-Spektrophotometer. Die Messungen in globalen Netzwerken für die Überwachung der Ozonschicht werden auf regionale und letztendlich auf Weltreferenzgeräte zurückgeführt. Im Rahmen des EMRP-Projektes „Traceability for atmospheric total column ozone“ wurden sowohl das Europäische Dobson-Referenzgerät, bewahrt vom Deutschen Wetterdienst im Hohenpeißenberg, als auch die Dobson-Weltreferenz, geführt vom NOAA/ESRL in Boulder, USA, bei der PTB in Braunschweig charakterisiert. Ziele der Untersuchungen waren die Bestimmung der Bandpassfunktionen der Geräte sowie die Wellenlängenkalibrierung. Eine genaue Kenntnis der Geräteeigenschaften soll helfen, die beobachteten systematischen Abweichungen zwischen Werten für die Gesamtozonsäule, ermittelt von Dobson- und Brewer-Gerätetypen zu erklären. Demnächst werden auch europäische Brewer-Referenzgeräte bei der PTB charakterisiert. (S. Nevas, FB 4.1, saulius.nevas@ptb.de)

#### **Auswertung von Mikrovesikeln mit der Elektronenspektroskopie**

In der medizinischen Forschung werden von Körperzellen produzierte Mikrovesikel zur Diagnose von Krankheiten herangezogen. Im Rahmen eines europäischen Projekts (EMRP HLT02, <http://www.metves.eu/>) wurden diese Vesikel mithilfe der Elektronenmikroskopie abgebildet und mit einer speziell entwickelten Software erkannt und hinsichtlich ihrer Größe ausgewertet. (P. Cizmar, E. Buhr, FB 4.2, egbert.buhr@ptb.de)

#### **Telefonzeit im IP-Zeitalter**

Der von der PTB zur Verbreitung der gesetzlichen Zeit angebotene Telefonzeitdienst erfolgt derzeit im ISDN-Standard. In der PTB wurden Untersuchungen durchgeführt, die zeigten, dass auch über

das Jahr 2018 hinaus, wenn nach Auskunft der Deutschen Telekom die IP-basierte Telefonie eingeführt sein wird, der von der PTB angebotene Telefonzeitdienst weiter genutzt werden kann. (J. Becker, FB 4.4, juergen.becker@ptb.de)

### **Internationale Angelegenheiten**

#### **Galileo in Braunschweig**

Gemeinsam mit der Europäischen Raumfahrtagentur ESA veranstaltete die PTB im Jahr 2015 das 5. Kolloquium „Scientific and Fundamental Aspects of the Galileo Programme“. Über 100 Wissenschaftler diskutierten die Verknüpfung von Satellitennavigation mit vielfältigen wissenschaftlichen Fragestellungen. (A. Bauch, FB 4.4, andreas.bauch@ptb.de)

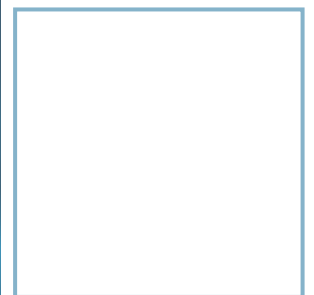
#### **Frequenznormale und Metrologie**

Das „8<sup>th</sup> Symposium on Frequency Standards and Metrology“ wurde von der PTB im Oktober 2015 am Templiner See in Potsdam ausgerichtet. Das Symposium bietet im Abstand von etwa sieben Jahren ein internationales Diskussionsforum für Präzisionsfrequenznormale. 180 Wissenschaftler aus aller Welt stellten fundamentale physikalischen Aspekte und ihre neuesten Ideen, Ergebnisse und Anwendungen von Frequenznormalen vor. Besondere Aufmerksamkeit fanden optische Atomuhren mit relativen Unsicherheiten von wenigen  $10^{-18}$ , ihre Anwendung zur Beantwortung fundamentaler Fragen wie einer möglichen Variation von Naturkonstanten, das neu entstehende Feld einer relativistischen Geodäsie und der Weg zu einer zukünftigen Neudefinition der Zeiteinheit. (F. Riehle, Abt. 4, fritz.riehle@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 speziellen Auswertalgorithmen 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 zum einen den Einsatz dimensioneller Präzisionsmesstechnik für die Bestimmung von Materialeigenschaften, wie z. B. der Härte, sowie zum anderen den Einfluss von Materialeigenschaften auf das Ergebnis dimensioneller Messergebnisse sowie auch die Berücksichtigung von Materialeigenschaften bei der Fertigung von Komponenten für metrologische Anwendungen. Es wird anhand der Beispiele deutlich, dass eine genauere Kenntnis von Materialeigenschaften Fortschritte sowohl in

der Präzisionsmesstechnik als auch in der Präzisionsbearbeitung ermöglicht.

### **Bestimmung von mechanischen Materialeigenschaften**

#### **• Härte**

Bei der Bestimmung mechanischer Materialeigenschaften steht die Härte als Eigenschaft eines Körpers, einen materialspezifischen Widerstand gegen das Eindringen eines anderen Körpers aufzuweisen, aufgrund ihrer großen technischen Bedeutung im Vordergrund. Es gibt eine Vielzahl genormter Härteprüfverfahren, um der Vielfalt an unterschiedlichen Materialien und deren Anwendungen Rechnung zu tragen.

Bild 1 zeigt die Unterteilung der in der Industrie etablierten Härteprüfverfahren in Verfahren für Metalle und Kunststoffe. Bei den Verfahren für Metalle wird zwischen statischen und dynamischen Verfahren (Leeb) unterschieden. Die statischen Verfahren lassen sich nun noch einmal nach Verfahren unterteilen, die unter angelegter Kraft prüfen (Martenshärte), und Verfahren, die nach Wegnahme der Kraft prüfen (Brinell, Vickers, Knoop und Rockwell). Bei Kunststoffen gibt es ein Verfahren, bei dem die Krafterzeugung mit einer Feder realisiert wird (Shore), und ein Verfahren, bei dem die Kraft mit Massen erzeugt wird (IRHD). Die Härteprüfverfahren verwenden Eindringkörper mit unterschiedlichen Formen (Kugel, Kegel, Pyramide) und aus verschiedenen Materialien (Hartmetall, Diamant). Sie unterscheiden sich zudem im Ablauf des Be- und Entlastungszyklus.

Voraussetzung für die Realisierung rückgeführter Härteprüfverfahren in der PTB mit erzielbaren Messunsicherheiten von oftmals unter 1 % ist die Kalibrierung der aufzuwendenden Prüfkräfte und der Bewegung des Eindringkörpers während des Be- und Entlastungszyklus sowie die präzise Charakterisierung der Geometrie des Eindringkörpers und des bei der Belastung erzeugten Härteeindrucks in den zu untersuchenden Materialproben. Zur präzisen messtechnischen Erfassung der Bewegung des Eindringkörpers werden häufig laserinterferometrische Messverfahren eingesetzt, die in die Härteprüfmaschinen integriert wurden. Für die Bestimmung der Geometrie der Eindringkörper werden ebenfalls interferometrische Messverfahren herangezogen. Außerdem wird ein metrologisches Rasterkraftmikroskop mit großem Messbereich von 25 mm × 25 mm × 5 mm verwendet, um die Geo-

Titelbild:

Neues Chirp-Normal zur Untersuchung des Übertragungsverhaltens von Oberflächenmessgeräten. Die Normale wurden in der Abteilung Fertigungsmesstechnik entwickelt und mittels Diamantdrehen gefertigt.

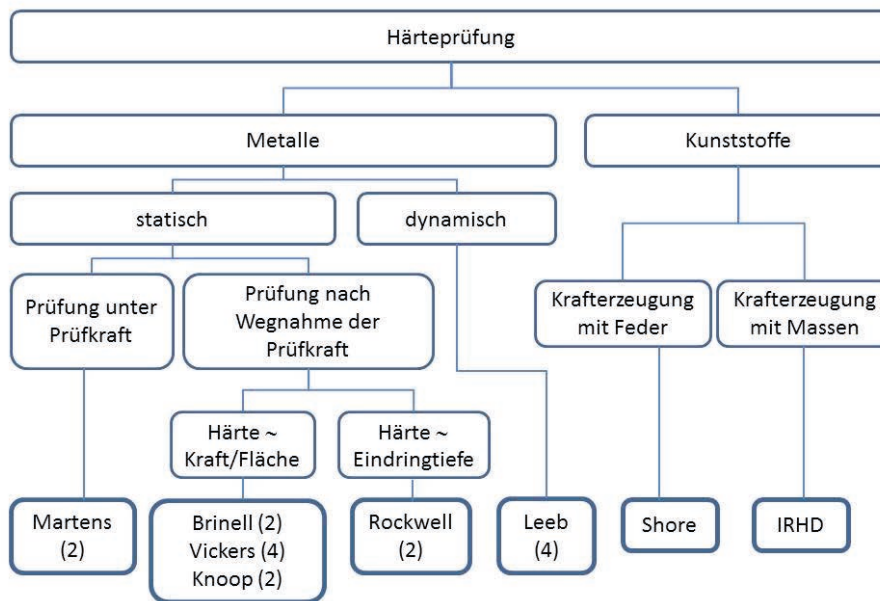


Bild 1: Übersicht über die verschiedenen genormten Härteprüfverfahren

( ) Anzahl der Geräte

metrie von Referenz-Eindringkörpern insbesondere in der Umgebung der Spitze oder des Kontaktbereiches mit hoher Genauigkeit zu erfassen. Gerade bei ganz kleinen Eindrücken ist die Kenntnis der Flächenfunktion des Eindringkörpers entscheidend für die genaue Bestimmung des Härtewertes. Für die Messungen der geometrischen Merkmale der Härteeindrücke werden bislang in der Regel optisch hochauflösende Messmikroskope verwendet. Zu sehr kleinen Eindrücken hin liefern Rasterkraftmikroskope genauere Details. Die Kalibrierergebnisse für die Härte werden schließlich über Härtevergleichsplatten an die Industrie weitergegeben.

• **Biegesteifigkeit**

Für die Weitergabe von kleinen Kräften mittels Kraft-Transfornormalen ist die Biegesteifigkeit der verwendeten Federelemente zu bestimmen. Ein wichtiger Anwendungsbereich für die Kalibrierung von Biegesteifigkeiten stellen die in Rasterkraftmikroskopen eingesetzten Mikro-Biegebalken bzw. Cantilever dar. Im Berichtszeitraum wurde eine neue Messmethode zur Kalibrierung der Biegesteifigkeit von AFM-Cantilevern auf Basis von MEMS-Referenzfedern im Rahmen des europäischen Verbundforschungsprojektes MechProNO entwickelt. Hierbei werden mithilfe federnd gelagerter MEMS-Aktoren die AFM-Cantileverspitzen ange-

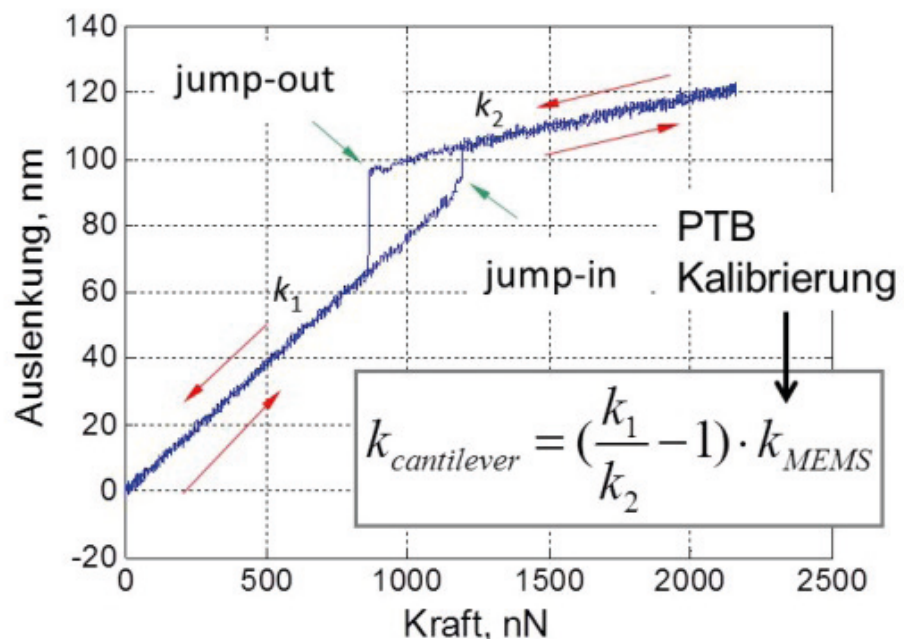


Bild 2: Gemessene Auslenkungs-Kraft-Kurve während der Kalibrierung der Biegesteifigkeit eines AFM-Cantilevers  $k_{cantilever}$  mit der MEMS-Biegesteifigkeitsmesseinrichtung ( $k_1, k_2$ : Steigungen,  $k_{MEMS}$ : Steifigkeit MEMS)

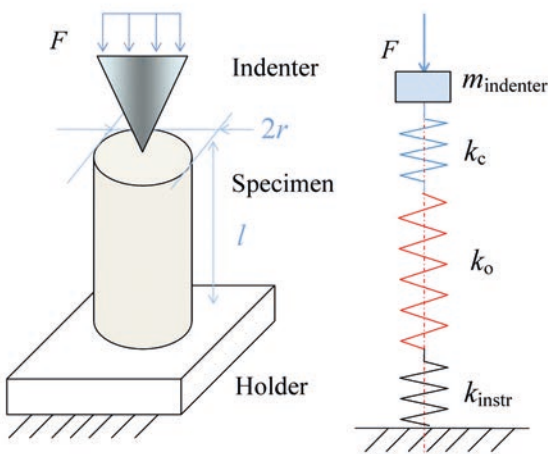
hoben und wieder abgesenkt. Die Biegesteifigkeit der AFM-Cantilever ergibt sich aus dem Verhältnis der Steigungen (Bild 2) der vom MEMS gemessenen Kraft-Auslenkungskurven vor (Parameter  $k_1$  im Bild 2) und nach Kontakt (Parameter  $k_2$  im Bild 2) von MEMS und AFM-Spitze und der Steifigkeit des MEMS-Aktors. Die MEMS-Steifigkeit wurde mithilfe der Mikrokraftmesseinrichtung der PTB, die aus einer kapazitiven Nanopositioniereinrichtung und einer kalibrierten Kompensationswaage besteht, bestimmt.

Mit der neuen MEMS-Biegesteifigkeitsmesseinrichtung sind Kalibrierungen der Biegesteifigkeit  $k$  von AFM-Cantilevern im Bereich von  $0,05 \text{ N/m} < k < 100 \text{ N/m}$  mit einer Unsicherheit von 7 % möglich.

• **Nanoindentation**

Bei der mechanischen Charakterisierung von Nano-Objekten, wie z. B. Nanosäulen, ist die Messunsicherheit der instrumentierten Eindringprüfung (Nanoindentationsprüfung) nicht nur von der Messunsicherheit des Nanoindentationsgerätes, sondern auch von den verwendeten Datenanalysemodellen abhängig. Für die weitere Verbesserung der Messunsicherheit der Nanoindentationsprüfung wurde im Rahmen des EMRP-Projektes MeProVisc ein interferometrisches Messsystem zur In-situ-Kalibrierung des Tiefenmesssystems von Nanoindentationsgeräten mit Sub-Nanometer-Auflösung entwickelt. Für die Messung der mechanischen Eigenschaften von Nanosäulen mit relativ hohem Aspektverhältnis mittels Nanoindentation wurde zudem ein neuartiges Datenanalysemodell entwickelt (s. Bild 3 links).

Bild 3: links: Analytisches Modell für die Nanoindentations-Prüfung zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften von Nano-Objekten  
rechts: auf Basis des Modells gemessene Ergebnisse für  $E_{IT}$  von 500 nm hohen Si-Nanosäulen mit unterschiedlichen Durchmessern

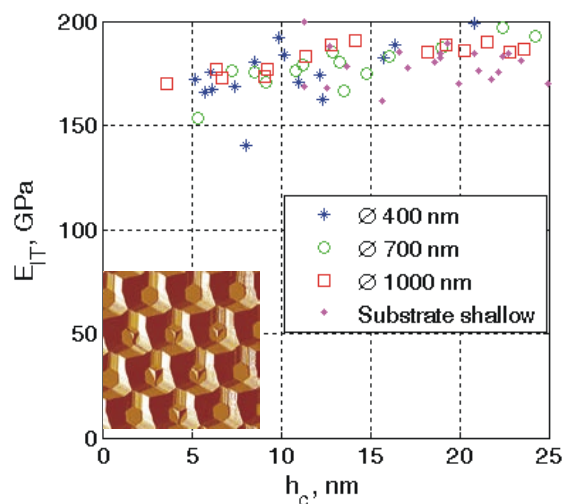


Wesentliche Neuerung ist die Berücksichtigung des Einflusses der Körpersteife der Nanosäulen. Die Fähigkeit des Modells wurde durch experimentelle Untersuchungen an geätzten Silizium-Nanosäulen mit gleicher Höhe, aber unterschiedlichem Durchmesser bestätigt (s. Bild 3 rechts). Die so an den Nanosäulen bestimmten Eindringmodule  $E_{IT}$  stimmen sehr gut mit den Werten überein, die an flächigen Silizium-Proben erhalten wurden.

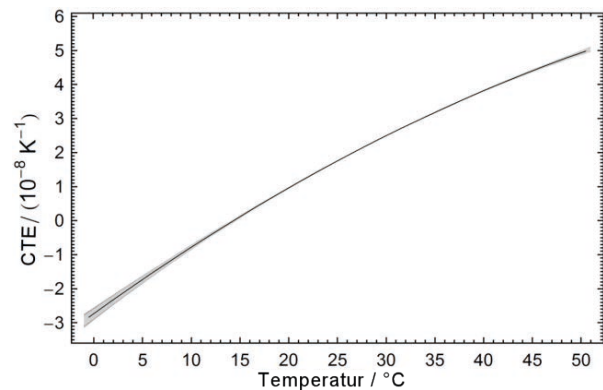
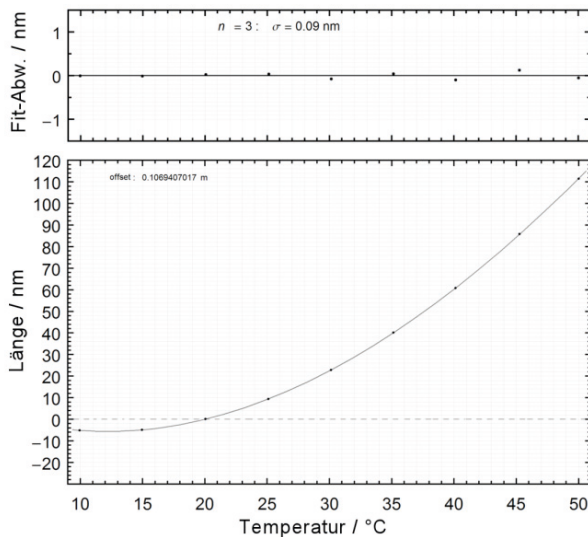
**Dimensionelle Messtechnik zur Bestimmung von Materialeigenschaften**

• **Thermischer Ausdehnungskoeffizient (coefficient of thermal expansion, CTE)**

Thermisch stabile Materialien sind wichtige Komponenten von Präzisions-Messgeräten sowie auch von Fertigungsmaschinen. Insbesondere keramische und glaskeramische Materialien mit  $CTE \leq 10^{-8}$  werden von den Herstellern für verschiedene High-Tech-Anwendungen weiter optimiert. Aus temperaturabhängigen Messungen der Länge von Probekörpern wird der temperaturabhängige CTE definitionsgemäß durch Ableitung der Länge nach der Temperatur und Normierung auf die Länge bestimmt. Mittels abbildender Vakuuminterferometer lässt sich die absolute Länge von Maßverkörperungen lateral aufgelöst mit Sub-nm-Genauigkeit darstellen (s. Bild 4). Zur Bestimmung der thermischen Ausdehnung werden die Daten gemessener Längen als Funktion der Messtemperatur durch ein Polynom n-ten Grades angepasst. Diese Anpassung basiert auf der Verarbeitung von symbolischen Ausdrücken, d. h. jeder Datenpunkt wird zunächst als Variable behandelt. Durch dieses Vorgehen wird die Messunsicherheit der Eingangsgrößen explizit berücksichtigt. Die resultierende Gesamtmessunsicherheit des CTE beinhaltet zudem







einen Beitrag, der die Freiheit bei der Wahl des Polynomgrades berücksichtigt.

Das Ultrapräzisionsinterferometer wurde für den Temperaturbereich von 10 °C bis 50 °C konzipiert. Um Messungen auch bei sehr tiefen Temperaturen (bis zu 7 K) für Anwendungen der Materialien in Weltraummissionen zu ermöglichen, wurde es um einen kryogenen Messpfad erweitert.

Temperaturänderungen können Strukturumwandlungen von Materialien in Gang setzen bzw. beeinflussen. Dies äußert sich in einer zum Zeitpunkt der Temperaturänderung verzögerten Längenänderung, genannt Längenrelaxation. Amorphe Materialien und Metalle unterliegen ständiger interner Strukturwandlung. Damit einher geht eine Änderung der Geometrie. Messungen der Langzeitstabilität der Länge von Körpern geben Aufschluss über den Status dieses Prozesses. Ein Vorteil des Messprinzips der absoluten (interferentiellen) Längenmessung besteht darin, dass die Probekörper entnommen werden und zu einem späteren Zeitpunkt wieder zur Messung eingesetzt werden können. Dies ermöglicht die Untersuchung der Langzeitstabilität von Materialien bei beliebig großem Zeitintervall zwischen den Einzelmessungen.

#### • Zeitliche Stabilität von Verbindungstechniken

Bei Baugruppen in Werkzeugmaschinen, optischen Instrumenten, Rasterkraftmikroskopen oder in Halbleiter-Fertigungsanlagen können Längenänderungen auftreten, die so klein sind, dass man sie mit herkömmlichen Messmitteln nicht nachweisen kann. Im Rahmen des europäischen Verbundforschungsprojekts „Thermal design and dimensional drift“ (T3D) wurden in der PTB diverse Verbindungstechniken hinsichtlich Langzeitverhalten und

Bild 4: links: Länge einer 100-mm-Maßverkörperung, die aus einem speziellem, niedrig-ausdehnendem Material hergestellt wurde, als Funktion der Temperatur (Offset = Länge bei 20°C). Im oberen Bereich ist die Abweichung der Messdaten von einem Fit-Polynom 3. Grades gezeigt. Rechts: Resultierender thermischer Ausdehnungskoeffizient (CTE, durchgezogene Kurve) und dessen Messunsicherheit (grauer Bereich) als Funktion der Temperatur.

Reaktion auf thermische Einflüsse mit einer Genauigkeit von etwa einem Nanometer untersucht. Dazu gehörten klassische Techniken wie Schrauben, Kleben oder Löten, aber auch neuartige Verbindungstechniken wie z. B. silikatisches Bonden.

Aufgrund der erwarteten Längenänderungen im Nanometerbereich wurden als Grundelemente Parallelendmaße benutzt. Um die dimensionelle Stabilität sowohl senkrecht als auch seitlich zu den Verbindungsflächen zu messen, wurden Verbindungen zwischen Endmaßen entweder mit den End- oder den Seitenflächen hergestellt. Zusätzlich wurde auch die Orientierung der Oberflächen durch Auswertung der Interferenz-Phasentopografie ermittelt (s. Bild 5). Gemessen wurde mit den hochgenauen Interferometern der PTB, dabei wurde die zeitliche Stabilität der Verbindungen über einen Zeitraum von einem Jahr überprüft. Im selben Zeitraum wurde das thermische Verhalten im Bereich von 10 °C bis 30 °C untersucht. Die Schraubverbindungen zeigten bei Länge und Orientierung keine nachweisbare Änderung. Klebeverbindungen verhalten sich dagegen je nach Aushärtung und Feuchtigkeitsaufnahme des Klebstoffs bzw. Parallelität der Klebefuge sehr unterschiedlich. Bei gelöteten und gebondeten Verbindungen hängt das Verhalten hauptsächlich von der Dicke der Verbindungsschicht ab: je dünner, desto konstanter sind Länge und Orientierung.

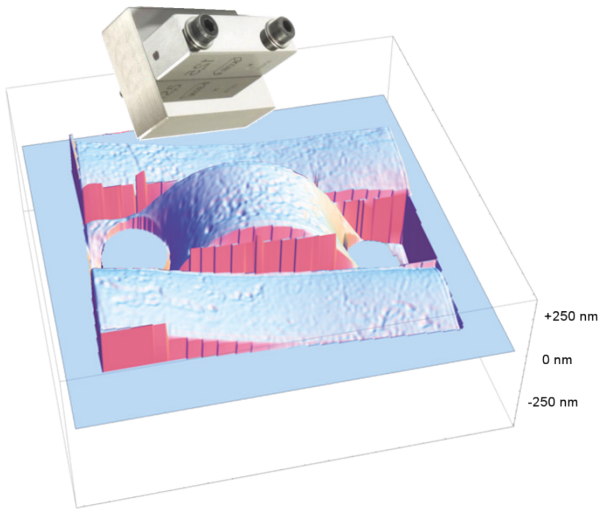
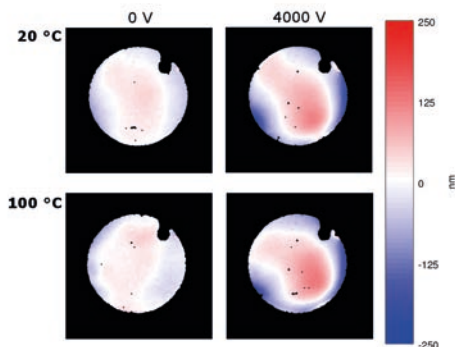


Bild 5: Ein an eine Endplatte geschraubtes Endmaß (Foto oben im Bild). Bei der Phasentopografie kann man innerhalb einer Wellenlänge topografische Änderungen sehr fein messen. In der Darstellung hier sind die auftretenden Phasensprünge um ganzzahlige Vielfache der Wellenlänge an den Übergängen zwischen Basisplatte und Endmaß bzw. im Bereich der Schrauben nicht korrigiert worden, um die eigentliche Verbiegung sichtbar zu machen. Man sieht deutlich, dass sowohl die Endmaßoberfläche (mittlerer Bereich) als auch die Basisplatte (Bereich oben und unten) durch die beim Anziehen eingebrachten Kräfte Verformungen aufweisen.

• Untersuchungen von funktionellen Materialien bei hohen Temperaturen

Funktionelle Materialien, wie z. B. Piezokeramiken, finden Anwendung in Einsatzgebieten wie z. B. Automobilindustrie, Luftfahrttechnik, Messtechnik, Energieerzeugung oder Prozessüberwachung. Zunehmend wird auch der Einsatz bei hohen Temperaturen angestrebt. Im Rahmen des europäischen Verbundforschungsprojekts METCO (Metrology of Electrothermal Coupling) wurden geeignete Materialien und eine entsprechende Messinfra-

Bild 6: links: Höhentopografie einer PZT-Probe bei 20 °C und 100 °C ohne und mit angelegter Spannung; rechts: Piezoelektrisch induzierte Längenänderung bei 20 °C (blau) und 100 °C (rot)



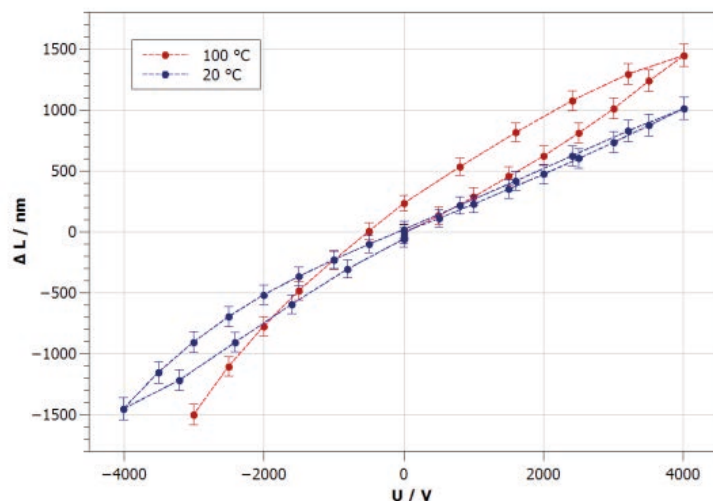
struktur entwickelt, um die Kopplung zwischen mechanischen, elektrischen und thermischen Eigenschaften in einem großen Temperaturbereich untersuchen zu können.

In der PTB werden hierzu Längenänderungen an Piezokeramiken bei hohen Temperaturen (derzeit bis 200 °C) und angelegtem elektrischem Feld (-2 kV/mm bis +2 kV/mm) interferometrisch gemessen. Die Funktionalität der eigens dafür entwickelten Probenumgebung wurde an einer Blei-Zirkonat-Titanat-Keramik (PZT) bei verschiedenen Temperaturen getestet. Dabei wurde der piezoelektrische Verzerrungskoeffizient  $d_{33}$  bei 20 °C und bei einer Temperatur von 100 °C aus der gemessenen piezoelektrisch induzierten Längenänderung ermittelt. Das Ergebnis bei 20 °C stimmt im Rahmen der Messunsicherheit mit den Herstellerangaben überein. Der bei 100 °C gemessene Wert folgt dem Trend, den man für PZT aufgrund seiner Materialeigenschaften erwarten kann:  $d_{33}$  wird mit zunehmender Temperatur größer (s. Bild 6).

Der Vorteil des PTB-Interferometers liegt darin, dass es sich um ein abbildendes System handelt, sodass nicht nur punktweise Längenmessungen möglich sind, sondern eine orts aufgelöste Längensvariation (Längentopographie) der kompletten Probenoberfläche gemessen werden kann. Dies liefert zusätzliche Informationen, z. B. über Inhomogenitäten oder Randeefekte.

• Einflüsse von Materialeigenschaften auf dimensionelle Messergebnisse

Materialeigenschaften spielen bei der Durchstrahlung mit Röntgenstrahlung in der industriellen Computertomografie (CT) eine wichtige Rolle,



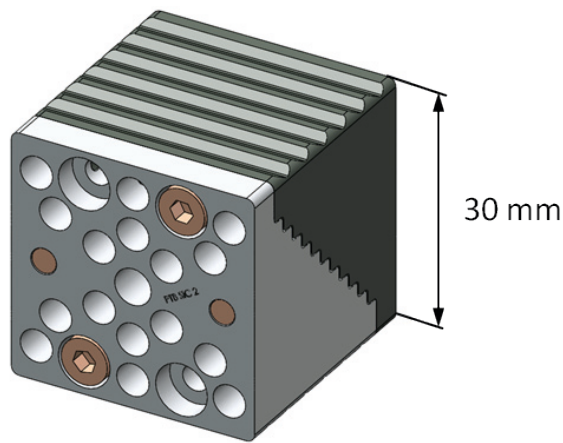
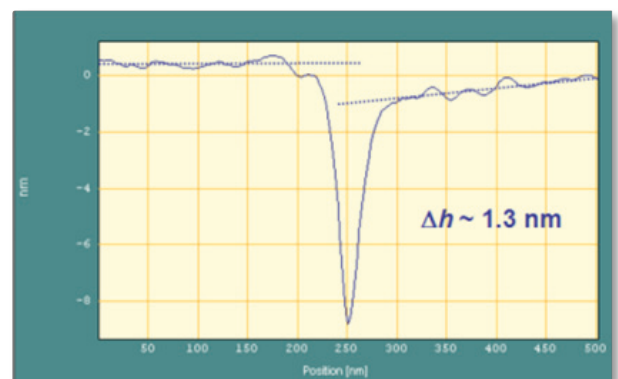
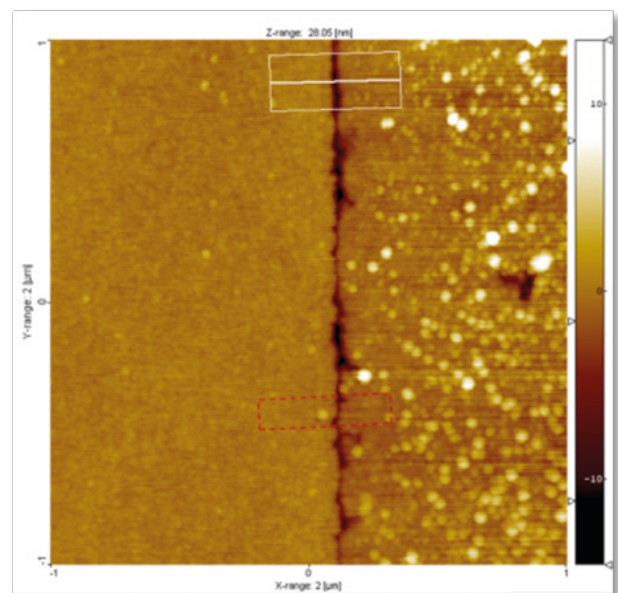
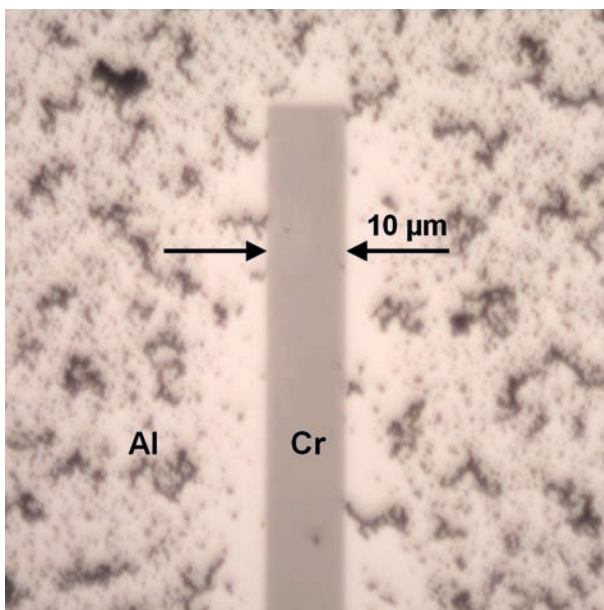


Bild 7: Prüfkörper zur Untersuchung des Materialeinflusses auf dimensionelle CT-Messungen. Links: Mikro-Tetraeder aus 4 Rubinkugeln mit jeweils 0,5 mm Durchmesser, rechts: Zweigeteilter Prüfkörper mit durchgehenden zylindrischen Bohrungen zur Bestimmung der Längenmessabweichung von Computertomografen bei der Messung von Multimaterial-Objekten

wenn es darum geht, 3D-Geometrien von Messobjekten, insbesondere auch deren Innenstrukturen, zu bestimmen. Für die systematische Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Materialien auf CT-Messergebnisse wurden verschiedene Referenzobjekte entwickelt. Bild 7 links zeigt beispielhaft einen aus 4 Präzisions-Rubinkugeln mit jeweils 0,5 mm Durchmesser realisierten Mikro-Tetraeder. Zur Untersuchung des Materialeinflusses bei CT-Messungen wurden darüber hinaus Tetraeder mit unterschiedlichen Kugelmateriale hergestellt. Bei diesen Prüfkörpern wurde jeweils eine Rubinkugel durch eine Kugel aus einem Material mit ähnlicher Röntgenabsorption (Siliziumnitrid) bzw. aus einem Material mit wesentlich stärkerer Röntgenabsorp-

tion (Stahl, Zirkonoxid) ersetzt. Weiterhin wird im Rahmen eines europäischen Verbundforschungsprojektes untersucht, wie die Eigenschaften von industriellen Computertomografen bei dimensionellen Messungen von Multimaterial-Objekten spezifiziert und geprüft werden können. Bild 7 rechts zeigt einen dafür entwickelten Prüfkörper, der aktuell gefertigt wird.

Bild 8: Links, mikroskopische Aufnahme des topografiefreien Normal, rechts oben und rechts unten AFM-Messung des Übergangsbereiches zwischen den Materialpartnern Chrom (links) und Al (rechts), wobei nicht klar ist, ob die beobachtete Höhendifferenz von 1,3 nm „real“ ist oder ob das unterschiedliche Kraftverhalten (Van-der-Waals-Kräfte) der beiden Materialien Chrom und Al zur Spitze (Si) eine „virtuelle“ Topografie vortäuscht





### Topografiefreie Referenzmaterialien für die Oberflächenanalytik

Zur Charakterisierung der lateralen Auflösung von Messgeräten der Oberflächenanalytik wie z. B. Imaging Photoelektronenspektroskopie (xray-photoelectron spectroscopy (XPS)) werden Strukturen genutzt, deren Oberfläche aus verschiedenen Materialien besteht. Zur Vermeidung von Beugungseffekten müssen die Übergänge zwischen den Materialien topografiefrei sein. Mithilfe eines neuartigen Herstellungsprozesses wurden im Rahmen des europäischen Verbundforschungsprojektes „Surf-Chem“ Prototypen eines topografiefreien Normals hergestellt und erfolgreich getestet.

Das Referenzmaterial besteht aus einem Glaswafer, auf den Strukturen aufgebracht sind, die aus verschiedenen Materialien bestehen, deren Oberfläche eben ist (topografiefrei). So ist es möglich, die Qualität der Abbildung eines Imaging-XPS-Systems zu beurteilen. Weiterhin können derartige topografiefreie Strukturen dazu genutzt werden, die Materialabhängigkeit der Kraftwechselwirkung bei der Messung mit Rasterkraftmikroskopen (AFM) zu untersuchen. Mittels AFM-Messungen konnte gezeigt werden, dass die Oberfläche des neu entwickelten Referenzmaterials und speziell die Übergänge zwischen den Materialpartnern keine Lücken und keine Höhendifferenzen größer als 2 nm aufweisen (siehe Bild 8). In Imaging-XPS-Aufnahmen des Partner-Institutes BAM hat sich diese Struktur bewährt.

### Bearbeitung unterschiedlicher Materialien im Wissenschaftlichen Gerätebau

Um die unterschiedlichsten Werkstoffe in der PTB zu nutzen und um ihre Eigenschaften zu untersuchen, müssen die Werkstoffe zunächst bearbeitet werden. Dabei gibt das Messprinzip oder die Anwendung vor, welche Oberflächenstruktur eingestellt werden muss. Mit diesen Vorgaben entwickelt der Fachbereich Wissenschaftlicher Gerätebau die Bearbeitungsprozesse und die Fertigungsabfolge. Da hierfür häufig keine Parameter vorliegen, die übernommen werden können, müssen in Vorversuchen die Bearbeitungsmöglichkeiten für die verschiedenen Materialien zunächst untersucht werden. So wurden die unterschiedlichsten Materialien wie Platin-Rhodium-Legierungen (PtRh10), Niob, Silizium (s. Bild 9), Zerodur, Aluminiumnitrid und Zirkonoxid bearbeitet oder als Schichtwerkstoffe abgeschieden. Dabei kann der Wissenschaftliche Gerätebau auf ein großes Spektrum unterschiedlichster

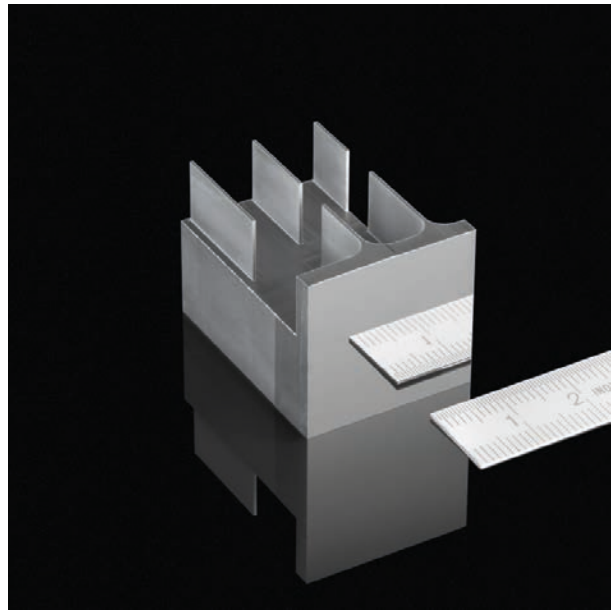


Bild 9: Aus Siliziumeinkristall gefertigtes monolithisches Röntgeninterferometer

Fertigungsverfahren und die hohe Kompetenz der Beschäftigten zurückgreifen. Die Möglichkeiten der additiven Fertigung bieten zur Erweiterung der Fertigungsmöglichkeiten interessante Optionen.



## In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

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

### Grundlagen der Metrologie

#### SI-traceable determination of the spring constant of a soft cantilever with 0.3 % uncertainty

The PTB's nanoforce facility was used to calibrate the spring constant of a soft AFM cantilever traceable to the SI. Besides investigations in air further measurements were made in a medium vacuum, in a high vacuum and in a Nitrogen atmosphere. The relative standard uncertainty of the spring constant calibration of a soft cantilever ( $K = 0.124 \text{ N/m}$ ) is better than 0.3 % (measurement in a medium vacuum) and the repeatability is better than 0.04 %. (V. Nesterov, FB 5.1, [vladmir.nesterov@ptb.de](mailto:vladmir.nesterov@ptb.de))

#### „TeleYAG“: ein brechzahlkompensierendes Interferometer für die Kalibrierung von geodätischen Basisstrecken

Im Rahmen des EMRP-Forschungsprojekts SIB60 „Surveying“ wurde ein absolut messendes Interferometer entwickelt, das für Längenmessungen bis 50 m verifiziert und bis ca. 1 km anwendbar ist. Durch gleichzeitige Verwendung von infrarotem und grünem Licht zur Längenmessung kann der Einfluss der Luftbrechzahl auf die Längenmessung kompensiert werden. Dieses sogenannte „TeleYAG“-Interferometer soll nach der Verifikation auf europäischen Referenzstrecken bis 1 km Länge als neues Primärnormal zur rückführbaren Darstellung großer Distanzen in der Geodäsie dienen. (K. Meiners-Hagen, FB 5.4, [karl.meiners-hagen@ptb.de](mailto:karl.meiners-hagen@ptb.de))

#### Neues Koinzidenzkriterium bei der Brechzahlbestimmung von Luft

Die genaue Bestimmung der Luftbrechzahl ist eine der wesentlichen Voraussetzungen bei der Darstellung der Länge von Maßverkörperungen mittels Interferometrie. Der Wert der Luftbrechzahl lässt sich durch den Einsatz von permanent evakuierten Zellen interferometrisch genau bestimmen. Ein hierfür notwendiger Vorwert der Brechzahl musste bisher auf eine Interferenzordnung genau bekannt sein. Ein neues Koinzidenzkriterium ermöglicht es nun den Eindeutigkeitsbereich bei der Bestimmung der Luftbrechzahl erheblich zu vergrößern. (R. Schödel, FB 5.4, [rene.schoedel@ptb.de](mailto:rene.schoedel@ptb.de))

#### Aktive Laser-Intensitätsstabilisierung der Phasenverschiebungsinterferometrie des Kugelinterferometers

Für die Phasenverschiebungsinterferometrie ist die Intensitätsstabilität der Lichtquelle eine wichtige Voraussetzung für hochaufgelöste Messungen. Am Kugelinterferometer, das zur Volumenbestimmung der Avogadro-Kugeln eingesetzt wird, wurde hierzu bisher eine Monitormessung am Faserausgang der Laserlichtquelle eingesetzt. Diese Art der Intensitätsmessung war durch ungenügende Gate-Gleichzeitigkeit und geringfügige Unterschiede bei Polarisation und Intensität in unterschiedlichen räumlichen Mittelungsbereichen limitiert. Mit der Etablierung eines aktiven Intensitätsregelungssystems konnte eine Verbesserung um eine Größenordnung erreicht werden. (R. Spolaczyk, FB 5.4, [reiner.spolaczyk@ptb.de](mailto:reiner.spolaczyk@ptb.de))

#### Kugelinterferometer: Wiederholungsmessungen über anderthalb Jahrzehnte zeigen bemerkenswerte Reproduzierbarkeiten

Zwei Siliziumkugeln, die bereits zur Jahrtausendwende für Dichtebestimmungen kalibriert wurden, sind nach 15 Jahren in zwei Durchgängen erneut gemessen worden. Die Konfiguration des Interferometers war in dieser Zeit wesentlichen Entwicklungsschritten unterzogen worden (Austausch der Interferometer-Optik, Umstellung auf Wellenlängen-Tuning, Änderung des Hubmechanismus, diverse Neujustagen). Die Werte des mittleren Durchmessers konnten für die zwei Kugeln in der Neubestimmung jeweils auf etwa  $10^{-9}$  reproduziert werden und liegen damit eine Größenordnung unter den bislang abgeschätzten Unsicherheiten. (A. Nicolaus, 5.41, [arnold.nicolaus@ptb.de](mailto:arnold.nicolaus@ptb.de))

#### Generation von kohärenten Dual-Frequenzkämmen aus einer Quelle

Im Rahmen des EMRP-Projekts SIB60 „Surveying“ wurde ein Dualkammgenerator aus einem gekoppelten Fabry-Perot-Filterpaar entwickelt. Dabei werden durch Filterung aus einem breitbandigen, kommerziellen „Seed“-Frequenzkamm mit 250 MHz Repetitionsrate zwei zueinander kohärente Kämmen mit unterschiedlichen Repetitionsraten im GHz-Bereich generiert. Dies bildet die Grundlage für ein neuartiges interferometrisches Verfahren zur hochgenauen Darstellung größerer Distanzen mithilfe von Frequenzkämmen, die sich metrologisch durch ihre direkte Rückführbarkeit auf die SI-Definition

des Meters auszeichnen. (J. Mildner, FB 5.4, jutta.mildner@ptb.de)

### **Neu entwickeltes Gravimeter für höchste Auflösungen**

Im Rahmen eines DFG-Projekts wurde im Wissenschaftlichen Gerätebau ein supraleitendes Gravimeter mit einer neuartigen Konstruktion des Beschleunigungsmesser-Aufbaus entwickelt und gefertigt. Zusammen mit der Verwendung von SQUID-Sensoren anstelle von kapazitiver Sensorik wird eine deutliche Verbesserung der Gravitationsmessung angestrebt. (F. Schmaljohann, FB 5.5, frank.schmaljohann@ptb.de)

### **Fertigung von Komponenten für eine Elektronenstrahl-Ionenfalle (EBIT)**

Hochgenaue komplexe Teile für Hochspannungselektroden und deren Innenleben, sogenannte Driftrohren, werden im Wissenschaftlichen Gerätebau der PTB im Rahmen eines gemeinsamen Projektes mit dem Max-Planck-Institut für Kernphysik in Heidelberg gefertigt. Die enge Zusammenarbeit zwischen den Ingenieuren und Fertigungstechnikern der PTB und den Physikern des MPIH ermöglichte auch neue Fertigungswege. (R. Meeß, FB 5.5, rudolf.meess@ptb.de)

### **Metrologie für die Wirtschaft**

#### **Kalibrierung der Biegesteifigkeit von AFM-Cantilevern mit MEMS-Referenzfederaktoren**

Im Rahmen des EU-Verbundforschungsprojektes MechProNO wurde eine neue rückführbare Methode zur Kalibrierung der Biegesteifigkeit von AFM-Cantilevern auf Basis von MEMS-Referenzfedern entwickelt und mit Messverfahren verglichen, die auf der Analyse des thermischen Rauschens von Cantilevern basieren. Ein Vergleich der Messungen ergab eine mittlere Abweichung von nur 7 %. (S. Gao, FB 5.1, sai.gao@ptb.de)

#### **Bestimmung von Mikro-Radien durch Profilmesungen**

Bei spanenden Bearbeitungsmethoden ist die Geometrie der verwendeten Mikroschneidkanten entscheidend für eine präzise Fertigung. Mit einem in der PTB entwickelten Tastschnittgerät lassen sich jetzt Mikro-Radien von Schneidkanten, Radiennormalen, Tastspitzen und Indenterspitzen mit einer Unsicherheit von kleiner  $U(k=2) \leq 0,12 \mu\text{m}$  messen. Erprobt wurde das Messverfahren an einem Radiennormal mit fünf dachkantförmigen Strukturen deren Spitzen nominelle Nennradien von  $1 \mu\text{m}$ ,  $3 \mu\text{m}$ ,  $5 \mu\text{m}$ ,  $10 \mu\text{m}$  und  $20 \mu\text{m}$  Radius aufweisen sol-

len. (P. Thomsen-Schmidt, FB 5.1, peter.thomsenschmidt@ptb.de)

### **Normal für die Kalibrierung der Oberflächenkenngrößen aus der Materialanteilkurve nach ISO 13565-1,2**

Ein an der Uni Kaiserslautern entwickeltes Profil für die Verkörperung der Oberflächenkenngrößen aus der Materialanteilkurve wurde in der PTB als Prototyp für ein Normal gefertigt und erfolgreich mit Tastschnittgeräten untersucht. Die Ergebnisse zeigen eine gute Eignung des Profils für die Rückführung der Rk-Kennwerte. (L. Jung-Albrecht, FB 5.1, lena.jung-albrecht@ptb.de)

### **Hochgeschwindigkeitsmikrotaster für die schnelle Rauheitsmessung in Strukturen mit großem Aspektverhältnis**

Piezoresistive monokristalline Silizium-Mikrotaster mit integrierter Spitze wurden erfolgreich erprobt, um Rauheitsmessungen mit deutlich höheren Geschwindigkeiten von bis zu  $15 \text{ mm/s}$  verlässlich durchführen zu können. (L. Doering, FB 5.1, lutz.doering@ptb.de)

### **Messplatz zur Dickenmessungen an Folien optimiert**

Für die Messung von Foliendicken im Bereich von  $10 \mu\text{m}$  bis  $2000 \mu\text{m}$  wird in der PTB ein Messgerät mit mechanischer Antastung und interferometrischer Positionsmessung betrieben. Dieser Messplatz wurde mit den Zielen einer höheren Automatisierung und verbesserter lateraler Auflösung grundlegend überarbeitet. (T. Ahbe, FB 5.1, thomas.ahbe@ptb.de)

### **Metrological large range AFM with high measurement speed up to 1 mm/s**

The metrological large range atomic force microscope (Met. LR-AFM) is used for versatile reference measurements with sub-nm uncertainty in the field of nanometrology. Recently its measurement speed was improved by a factor of more than 20, which significantly enhances its measurement throughput and reduces its measurement drift. The measurement repeatability at different scan speeds ranging from  $10 \mu\text{m/s}$  to  $1000 \mu\text{m/s}$  reaches  $\pm 0.7 \text{ nm}$  for step height measurements and  $\pm 5 \cdot 10^{-6}$  for grating pitch measurements, respectively. (G. Dai, FB 5.2, gaoliang.dai@ptb.de)

### Development and characterisation of a new silicon single crystal linewidth reference material

A new critical dimension (CD, often synonymously used for line width) reference material consisting of Si line structures with improved vertical parallel sidewalls has been developed in collaboration with the company Team-Nanotec. Each feature pattern has a group of five reference line features with nominal CD of 50 nm, 70 nm, 90 nm, 110 nm and 130 nm, respectively. Characterization of the standards using CD-AFM and TEM indicates the high quality of the line features: top corner radius of  $< 7$  nm, vertical sidewall (slope mostly within  $90^\circ \pm 0.5^\circ$ ), and very small line width variation (LWR down to 0.36 nm). (G. Dai, FB 5.2, gaoliang.dai@ptb.de)

### Simultaneous multi degree of freedom (DoF) measurement system

A new high accuracy and fast interferometric 6 DoF measurement system based on a modified homodyne Twyman-Green interferometer has been developed. It uses a novel signal acquisition and processing approach whereby a spatial interferogram is captured by a high-speed CMOS sensor and the registered fringe pattern is transformed into the frequency spectrum. The spectral representation is analyzed for its major components; the phase information directly correlates to the displacement of the positioning stage, a possible stage tilt during the scan causes a shift of the main fringe pattern frequency. The developed compact 6 DoF head uses multiple rays in parallel to detect simultaneously x-y-z displacements and roll-pitch-yaw movement. (G. Molnar, FB 5.2, gabor.molnar@ptb.de)

### Ultrapräzise Positionierung am Nanometerkomparator

Zur Minimierung der Antriebsschwingungen des Messschlittens am Nanometerkomparator wurden die Signale des Vakuum-Interferometers zur Feinregelung des Messschlittens mit einem Lorentz-Aktuator genutzt. Das neue Stellelement erweitert den bestehenden Antrieb auf Basis eines Linearmotors und wird durch einen dedizierten Lageregler angesteuert. In einem ersten Test konnte der Messschlitten im Sub-Nanometerbereich präzise positioniert werden, wobei ein Positionsrauschen von  $\pm 0,2$  nm bei einer Bandbreite von 100 Hz nachgewiesen wurde. (P. Köchert, FB 5.2, paul.koechert@ptb.de)

### Kalibrierung von Autokollimatoren bei räumlichen Winkeln und in variablen Abständen

Ein neuartiges Kalibriersystem für Autokollimatoren, der „Spatial Angle Autocollimator Calibrator“ (SAAC), ermöglicht es erstmals, Kalibrie-

rungen auch von räumlichen Winkeln von bis zu  $(2500 \times 2500)$  arcsec<sup>2</sup> und bei variablen Abständen von 300 mm bis 1800 mm durchzuführen. Durch die kartesische Anordnung von drei auf einen Reflektorwürfel ausgerichteten Autokollimatoren, von denen zwei als Referenzmesssysteme dienen, ist die Rückführbarkeit auf das Primärnormal der PTB für den ebenen Winkel gewährleistet. (O. Kranz, FB 5.2, oliver.kranz@ptb.de)

### Softwarebasierte Bestimmung und Nutzung von Qualitätsmaßen in der dimensionellen Computertomografie

Bei Messungen mit Röntgen-Computertomografen (CT) wird aktuell die Qualität der ermittelten Oberflächenpunkte nicht automatisiert bestimmt. In Kooperation mit dem Softwareunternehmen Volume Graphics wurde ein Qualitätsmaß für Oberflächenpunkte in CT-Daten entwickelt und prototypisch implementiert, das direkt aus den Messdaten heraus berechnet werden kann. (T. Schönfeld, FB 5.3, torsten.schoenfeld@ptb.de)

### Entwicklung eines neuen Großverzahnungsringnormals mit $d = 2$ m

Im Rahmen eines vom BMWi geförderten Verbundprojektes ist in der PTB ein neues Verzahnungsnormal entwickelt worden. Das Normal verkörpert je drei verschiedene Außen- und Innenverzahnungen, die auf einem Ring mit einem Außendurchmesser von etwa 2 m angebracht sind. Ziel des Projektes ist die Akkreditierung der ersten Konformitätsbewertungsstelle für Großverzahnungen beim Projektpartner in Bremen durch die DAkkS. Damit soll die aktuell bestehende Lücke zwischen bereits vorhandenen nationalen Großverzahnungsnormalen und den Anwendern in der Industrie geschlossen werden. (M. Stein, FB 5.3, martin.stein@ptb.de)

### PTB erweitert Dienstleistungsangebot im Bereich Softwaretest für Koordinatenmesssysteme

Im Rahmen eines internationalen Forschungsvorhabens wurde eine neue informationstechnische Infrastruktur zur Validierung von Algorithmen in metrologischer Software entwickelt. Der Dienst wird über ein neues Internetportal angeboten. Im Bereich der Koordinatenmesstechnik können neben der Auswertung von Formelementen nach der Methode der kleinsten Quadrate jetzt auch Minimumzone-Auswertungen validiert werden. Erste Zertifikate wurden schon ausgestellt. Weitere Informationen unter <https://tracim.ptb.de>. (K. Wendt, FB 5.3, klaus.wendt@ptb.de)

### **Neue Scanning-Artefakte zur Bewertung von Verzahnungsmessungen**

Zur Untersuchung der Eigenschaften von taktilen Verzahnungs-Messsystemen im Scanbetrieb wurden im EMRP-Projekt „DriveTrain“ zwei neue Scanning-Artefakte in Zusammenarbeit mit dem Wissenschaftlichen Gerätebau entwickelt. Diese mittels Drahterosion gefertigte Normale verkörpern je eine konkave und eine konvexe Evolvente, die sich bei einem Grundkreis vom Durchmesser 20 mm über einen Winkelbereich von 0° bis 270° erstrecken. An einem der Normale wurde bei beiden Evolventen zusätzlich eine definierte Welligkeit überlagert, wie sie in der Fertigung von Zahnrädern eine Rolle spielt. (D. Metz, FB 5.3, david.metz@ptb.de)

### **Konstruktion und Fertigung einer Magnetfeldmessvorrichtung**

Zur Steigerung der Energieeffizienz in neuen Motoren und Generatoren werden zunehmend Permanentmagnete eingesetzt. Im Rahmen einer Doktorarbeit wurde eine Vorrichtung zur Messung des zeitlichen Verlaufs der magnetischen Flussdichte  $B$  bei Temperaturen bis 150 °C von NdFeB-Magneten konstruiert und gefertigt. Dabei wird in dem Magnetjoch durch einen Wechselstrom ein Magnetfeld bis zur Entmagnetisierung der Permanentmagnete stetig erhöht. Es können sowohl gebogene Magnete, wie sie in Motoren eingesetzt werden, als auch Planmagnete im veränderlichen Luftspalt zwischen dem Magneten gemessen werden. (E. Luiken, FB 5.5, enno.luiken@ptb.de)

### **Internationale Angelegenheiten**

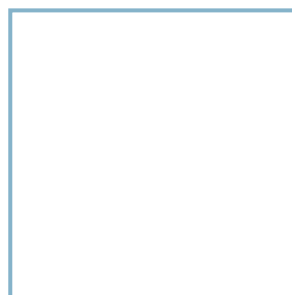
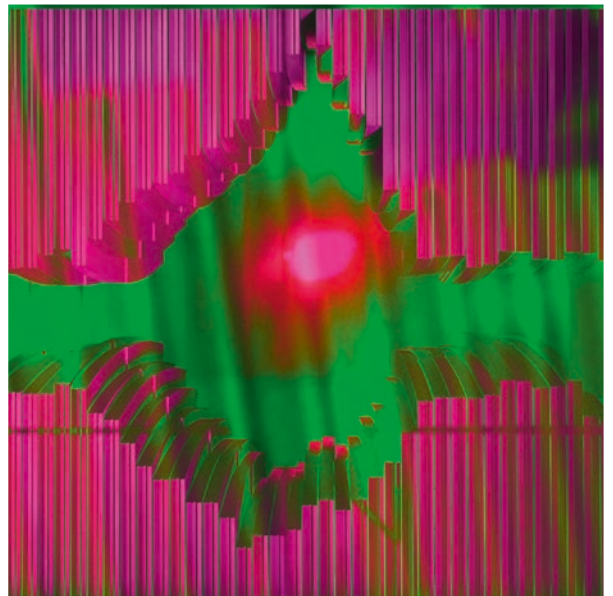
#### **„Highlights of 2014“ der Zeitschrift MST: 4 PTB-Beiträge zur dimensionellen Metrologie zählen dazu**

Die Zeitschrift „Measurement Science and Technology (MST)“, ein renommiertes internationales Fachjournal mit dem Schwerpunkt Messtechnik und einer mehr als 90-jährigen Tradition, hat in einer Rückschau auf die bei MST im letzten Jahr veröffentlichten Fachbeiträge 28 Arbeiten als „Highlights of 2014“ herausgehoben, darunter auch 4 Veröffentlichungen über neuere Arbeitsergebnisse aus der Abteilung Fertigungsmesstechnik. (H. Bosse, Abt. 5, harald.bosse@ptb.de)



# Abteilung 6

## Ionisierende Strahlung



Die fachliche Ausrichtung der Abteilung wurde im Berichtszeitraum in den Bereichen *Gesundheit des Menschen* und *Schutz der Umwelt vor den Gefahren ionisierender Strahlung* weiterentwickelt. Dabei geht es nicht nur um die direkte metrologische Unterstützung medizinischer Anwendungen ionisierender Strahlung, sondern auch um Untersuchungen zum grundlegenden Verständnis der Wirkmechanismen ionisierender Strahlung in biologischen Geweben, um Fragen des Strahlenschutzes für Personal und Patienten sowie die sichere Überwachung unserer Umwelt zum Schutz der Bürger vor den Gefahren radioaktiver Stoffe. Unsere messtechnische Begleitung wichtiger Umweltthemen trägt zum Erhalt und der Verbesserung unserer Lebensbedingungen bei. Mit der Entwicklung moderner Techniken für die Messung ionisierender Strahlung – seien es geladene Teilchen, Photonen oder Neutronen – engagieren wir uns in Projekten der wissenschaftlichen Grundlagenforschung. Dafür wurden richtungweisende Entscheidungen für neue Aufgaben getroffen, die sowohl Investitionen in neue Messmethoden als auch Änderungen in der Organisationsstruktur der Abteilung umfassen.

Einige Beispiele aus dem Berichtszeitraum werden im Folgenden vorgestellt. Ausführliche Berichte zu den einzelnen Themen finden Sie auch auf den Internet-Seiten der PTB.

### **Massenspektrometrische Radionuklidmessungen für Umweltproben-Referenzmaterialien**

Die PTB ist Referenzwertgeber bei nationalen und internationalen Vergleichsmessungen zur Überwachung der Umweltradioaktivität. Eine im Berichtszeitraum durchgeführte Nutzerbefragung hat einen großen Bedarf an metrologisch rückgeführten Referenzwerten für radiometrisch schwer messbare Radionuklide in Umweltproben ergeben, die entweder sehr lange Halbwertszeiten haben oder deren Alpha- oder Betastrahlen radiometrisch nur mit langen Messdauern zu bestimmen sind. Im Vergleich dazu ist der Zeitaufwand für eine massenspektrometrische Messung derselben Stoffmenge deutlich kleiner (Minuten statt Tage bis Wochen) und die Messempfindlichkeit z. B. Uran-238 um drei Größenordnungen besser. Anwendungsfelder für Umweltproben-Referenzmaterialien mit

Radionukliden sind u. a. der Strahlenschutz der Bevölkerung, die radioökologische Modellierung z. B. für die kerntechnische Entsorgung, der Schutz der Umwelt vor den schädlichen Wirkungen ionisierender Strahlung, aber auch Studien des radioökologischen Verhaltens von Radionukliden oder Studien zum Klimawandel, bei denen Radionuklide als Indikatoren eingesetzt werden.

Der Fachbereich *Radioaktivität* hat deshalb ein Konzept zur Einführung der Massenspektrometrie als zukunftsweisendes Messverfahren erstellt. In Ergänzung seiner radiometrischen Messverfahren soll in den kommenden Jahren ein Multi-Collector-Inductively-Coupled-Mass-Spectrometer (MC-ICP-MS) beschafft werden, damit das hohe Qualitätsniveau im Bereich der Umweltradioaktivität dauerhaft erhalten werden kann.

### **Neue Aufgaben für die medizinische Bildgebung**

Gemessen an der gesellschaftlichen Bedeutung der medizinischen Bildgebung war dieses Arbeitsgebiet an der PTB bisher weit unterrepräsentiert. Ein großer Teil der zivilisatorisch bedingten Strahlenbelastung der Bevölkerung resultiert heute aus der Röntgen-Computertomografie (CT). Auch in der Nuklearmedizin wird eine sichere und auf die Normale der PTB rückführbare Dosimetrie immer wichtiger.

Angeregt auch durch eine Stellungnahme externer Berater wurde eine Studie zum Thema „Medizinische Bildgebung mit ionisierender Strahlung – Aufgaben für die PTB“ erstellt. Neben einer Literaturrecherche wurden dazu neun Experten auf dem Gebiet der medizinischen Bildgebung an die PTB eingeladen, die ihre Sicht auf mögliche künftige Aktivitäten der PTB darstellten und mit PTB-Mitarbeitern diskutieren konnten (Bild 1). Dabei zeigte sich, dass eine Beteiligung der PTB bei einigen Aufgabenfeldern seitens der Anwender und Hersteller als wünschenswert, bei einigen als notwendig erachtet wird.

Anstrengungen von Medizingeräteherstellern und Radiologen zielen auf diagnostisch aussagekräftigere Bilder bei möglichst geringer Dosis. Dabei herrscht derzeit weder auf nationaler noch auf internationaler Ebene Klarheit darüber, welche Kenngröße für die Patientendosis bei der CT am besten geeignet ist. Die vor wenigen Jahren aufgenommenen Aktivitäten der PTB im Bereich der CT-Dosimetrie wurden daher als wichtig und richtig betrachtet.

Titelbild:

Multi-Leaf-Kollimator eines modernen klinischen Linearbeschleunigers für die externe Strahlentherapie mit Photonenstrahlung



Bild 1: Teilnehmer der Gesprächsrunde zur medizinischen Bildgebung

Bei der Quantifizierung der Bildqualität ist die Situation ähnlich: Während einige technische Kenngrößen wie Rauschspektren, Kontrast und räumliches Auflösungsvermögen bestimmt werden können, kann mit diesen allein der Wert eines Bildes für die Diagnostik nicht ermittelt werden. Ein Grund dafür sind neue Rekonstruktionsverfahren, die zwar einerseits die Bildqualität verbessern, andererseits aber eine nichtlineare Komponente in der Bildgebungskette darstellen. Als Folge davon können herkömmliche Verfahren zur Bestimmung der Bildqualität, die aus der linearen Systemtheorie stammen, nicht mehr sinnvoll angewendet werden. Neuere Ansätze zur Messung der Bildqualität, die unter anderem von der FDA (Food and Drug Administration, USA) verfolgt werden, beinhalten die mathematische Modellierung des menschlichen Beobachters, die eine statistische Analyse der Bildqualität erlaubt. An dieser Stelle besteht Klärungsbedarf, sowohl was die Begriffe (was ist Bildqualität?) als auch was die Entwicklung von Verfahren und deren Vereinheitlichung angeht.

Für die nuklearmedizinische Diagnostik fehlen Basisdaten. Insbesondere für kurzlebige Radionuklide werden rückführbare Messmittel für die Aktivität – vorzugsweise beim Anwender – sowie genaue Zerfallsdaten benötigt. Darüber hinaus sollte die PTB Mittel zur Durchführung von Vergleichsmessungen der Aktivität für multizentrische Studien bereitstellen. Um mittelfristig mit bildgebenden Systemen direkt die Aktivitäten im Patienten erhalten zu können, wurde die Entwicklung geeigneter Phantome für die Kalibrierung der bildgebenden Systeme als äußerst wünschenswert betrachtet. Dabei stellt die quantitative Bildgebung einen Schritt zur patienten-

individuellen Dosimetrie in der Nuklearmedizin dar.

Zunächst sollen die fehlenden Basisdaten bestimmt werden, bevor weitere Schritte unternommen werden. Als komplementäre Ergänzung zur CT-Dosimetrie wird sich eine neue Arbeitsgruppe in Kooperation mit anderen Abteilungen der PTB und externen Kooperationspartnern mit der Quantifizierung der Bildqualität befassen.

## **Organdosis von Patienten bei der medizinischen Computertomografie**

Die derzeit erhobenen Daten von effektiven Patientendosen in der medizinischen Computertomografie (CT) ergeben sich aus der vom CT angezeigten phantombezogenen Messgröße „Dosislängenprodukt“ und berechneten mittleren Konversionsfaktoren. Da sich Patienten aber durch ihre Körperabmessungen und -gewichte deutlich voneinander unterscheiden, kann die individuelle Patientendosis signifikant von dieser Standardpatientendosis abweichen. Darüber hinaus verwenden die heutigen CTs neue, Dosis sparende Technologien, die von der herkömmlichen Art der Dosisbestimmung nur unzureichend erfasst werden. Aus diesen Gründen ist es wünschenswert, die effektiven Dosen sowohl patienten- als auch scanspezifisch zu ermitteln. Es gibt bereits Simulationsprogramme, die derartig fortgeschrittene Dosisberechnungen innerhalb von wenigen Minuten nach einer CT-Aufnahme ermöglichen.

Eine wesentliche Voraussetzung zur Durchführung solcher Simulationen ist die Kenntnis eines möglichst exakten Modells der im Computerto-

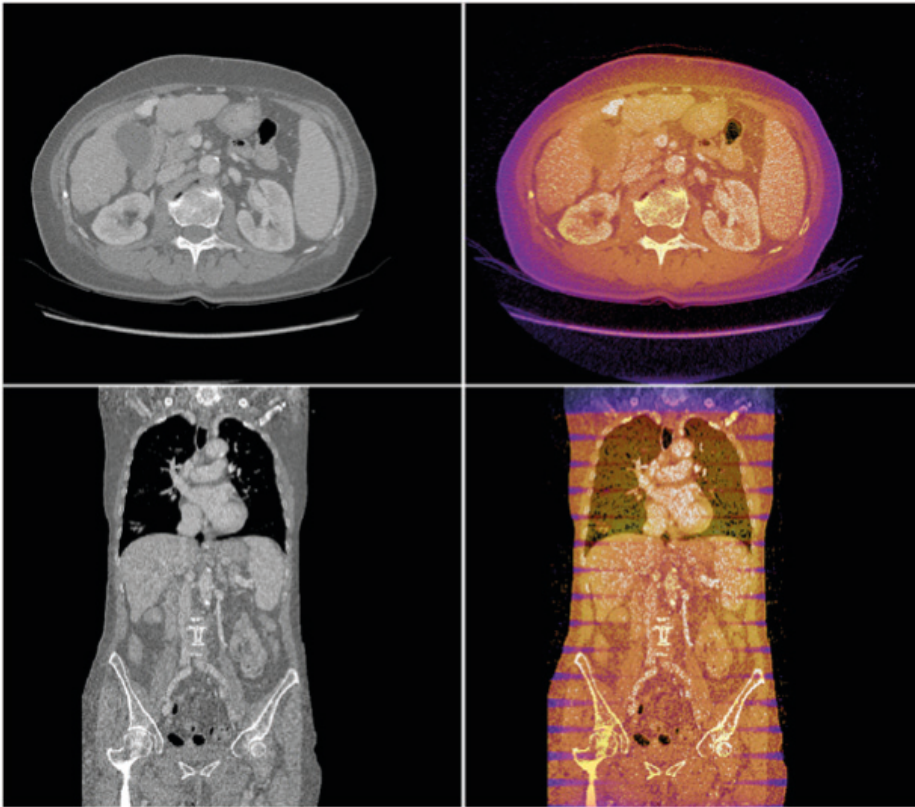


Bild 2: Die linke Seite zeigt das aus der CT-Aufnahme rekonstruierte Schnittbild (oben) und dreidimensionale Röntgenbild (unten) eines Patienten. Das rechte Bild zeigt farbcodiert die mit ImpactMC berechnete Dosisverteilung im Patienten nach der CT-Aufnahme. Simuliert wurde ein einfacher sequentieller Scanmodus bei einer Röhrenspannung von 120 kV und einem Röhrenstrom von 100 mA. Die Kollimation betrug 40 mm und es wurden 15 Rotationen in einem Abstand von 40 mm simuliert.

mografen verwendeten Röntgenquelle. Für solche Modelle müssen die Eigenschaften der im CT verbauten Komponenten bekannt sein, die aber von den Herstellern aus Wettbewerbsgründen streng geheim gehalten werden. Um dennoch Quellenmodelle aufstellen zu können, hat die PTB auf der Basis publizierter Arbeiten nichtinvasive Messmethoden entwickelt, die es erlauben, Photonenfluzspektren und materialäquivalente Formfilter von medizinischen CTs zu charakterisieren.

Die auf diese Weise ermittelten sogenannten „äquivalenten Quellenmodelle“ eines CTs wurden im Rahmen einer Masterarbeit auf ihre Eignung für die Berechnung von effektiven Patientendosen hin untersucht. Dazu wurden Ergebnisse von Organdosis-Berechnungen mit dem Programm „ImpactMC“ verglichen, die mit einem realen und einem äquivalenten Quellenmodell erhalten wurden. Die Untersuchungen wurden am CT-Dosimetrie-Messplatz der PTB durchgeführt. Die PTB besitzt einen medizinischen CT, dessen Komponenten zur Röntgenstrahlerzeugung (inklusive Filterung und Formfilter) genau bekannt sind und somit die Aufstellung eines realen Quellenmodells erlauben.

Die zugehörigen äquivalenten Quellenmodelle des CTs wurden bereits vorher ermittelt. Das Simulationsprogramm verwendet als Patientenmodell die dreidimensionalen Bilder der CT-Aufnahmen von Patienten. Derartige Datensätze wurden der PTB

vom Kooperationspartner Klinikum Braunschweig anonymisiert zur Verfügung gestellt. Somit konnten die Organdosen mit den verschiedenen äquivalenten Quellenmodellen und der realen Quelle berechnet und verglichen werden. Bild 2 zeigt ein Beispiel für eine berechnete dreidimensionale Dosisverteilung in einem Patienten nach einer simulierten CT-Aufnahme. Für die Auswertung der berechneten Dosisverteilungen wurden mithilfe des frei verfügbaren Programms „ImageJ“ die Organe Magen, Lunge, Kolon, Herz und Leber per Hand segmentiert, um die zugehörigen Organdosen zu bestimmen.

Ein wichtiges Ergebnis der Untersuchungen ist, dass die äquivalenten Quellenmodelle in Bezug auf die Berechnung von Organdosen mit dem verwendeten Simulationsprogramm „ImpactMC“ als adäquater Ersatz für die realen Quellen angesehen werden können. Die beobachteten Abweichungen betragen weniger als 10 %, was bei bisher akzeptierten Unterschieden in der Dosis zwischen Standardpatienten und individuellen Patienten von bis zu 50 % durchaus akzeptabel erscheint.

### Messvergleich in hochenergetischen Photonenfeldern

Die PTB betreibt seit den 1980er Jahren ein einzigartiges Referenzfeld für hochenergetische Photonenstrahlung gemäß der Norm ISO 4037-1. Durch



den Beschuss eines CaF-Targets mit Protonen einer Energie von 2,7 MeV werden Photonen im Energiebereich von 6 MeV bis 7 MeV erzeugt. Ein solches Feld wurde inzwischen auch von der Japan Atomic Energy Agency (JAEA) aufgebaut. Jetzt wurden beide Felder erstmalig im Rahmen einer bilateralen Vergleichsmessung verglichen. Dazu wurde die Dosisleistung des Referenzfeldes der PTB mit der Referenzkammer der JAEA bestimmt. Als zweite, unabhängige Methode wurden unterschiedliche Personendosimeter in den beiden Feldern kalibriert und die Kalibrierfaktoren verglichen. Mit beiden Verfahren konnte die Übereinstimmung im Rahmen der von beiden Instituten angegebenen Unsicherheiten bestätigt werden.

### Ionisierungsquerschnitte von DNS-Bausteinen für Protonen im Energiebereich des Braggpeaks

Die Verwendung von Ionenstrahlung in der Strahlentherapie von Krebserkrankungen bietet biologische und physikalische Vorteile gegenüber der konventionellen Strahlentherapie mit Photonen oder Elektronen. Bisher wird die erhöhte biologische Wirksamkeit von Ionenstrahlen lediglich durch einen Gewichtungsfaktor beschrieben. Im Rahmen des EMRP-Projekts „BioQuaRT“ wurden messbare physikalische Parameter der Spurstruktur von Ionenstrahlen auf ihre biologischen Auswirkungen auf zellulärer Ebene untersucht, um dosimetrische Messgrößen entwickeln zu können, welche die biologische Wirksamkeit direkt berücksichtigen.

Der Vergleich von nano- und mikrodosimetrischen Messungen mit Spurstruktursimulationen ist dabei von grundlegender Bedeutung. Für die Spurstruktursimulationen sind Wechselwirkungsquerschnitte als Eingangsdaten erforderlich. Bisher wurden in den üblichen Simulationsprogrammen dafür Daten von Wasser benutzt, wobei allerdings in den letzten Jahren große Abweichungen zu den Wirkungsquerschnitten komplexerer Biomoleküle festgestellt wurden. Da Strangbrüche in der DNS-Doppelhelix als wichtigster Beitrag zur Zellschädigung angesehen werden, wurden in dieser Arbeit die Wirkungsquerschnitte für Ionisationswechselwirkung mit den drei chemischen Analoga der DNS-Bausteine Tetrahydrofuran, Trimethylphosphat und Pyrimidin untersucht.

Ionisationsquerschnitte wurden bezüglich Emissionswinkel und Energie der Sekundärelektronen aufgelöst (doppelt differentiell) für Protonenstrahlen an Ionenbeschleunigeranlagen der PTB gemes-

sen. Der Energiebereich reichte von einigen MeV bis herunter zu 75 keV, also bis zum Bragg-Peak, bei dem die Ionisierung und die damit verbundene Zellschädigung am wahrscheinlichsten sind. Für die hohen Protonenenergien gibt es bereits gute analytische, semi-empirische und quantenmechanische Rechnungen, die wir mit unseren Messungen bestätigen konnten. Bei den Bragg-Peak-Energien bestehen hingegen noch große Diskrepanzen zwischen verschiedenen Theorien, sodass unsere Daten wertvolle Vergleichspunkte liefern konnten.

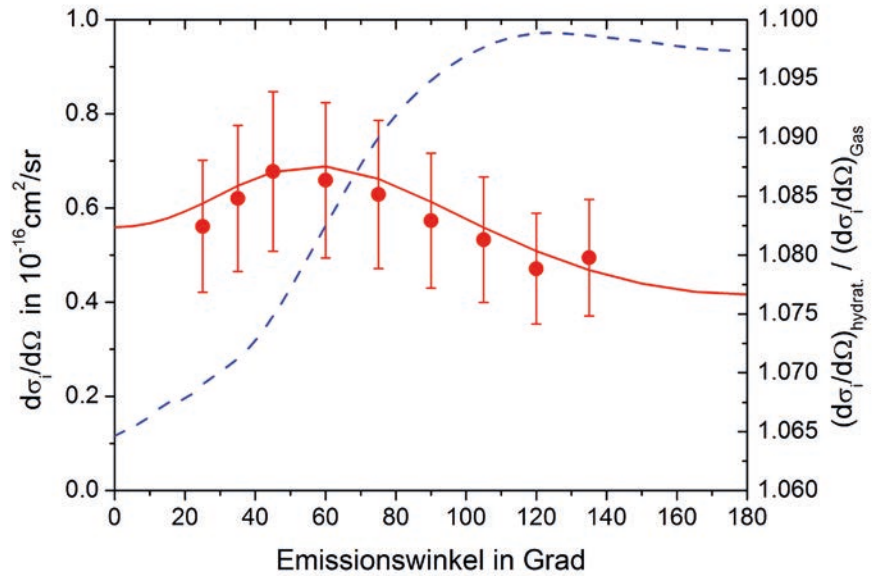
### Phaseneffekte der Elektronen-Wechselwirkungsquerschnitte von Biomolekülen

Für die biologische Wirksamkeit ionisierender Strahlung spielt die Spurstruktur von Sekundärelektronen im Bereich der DNA eine zentrale Rolle. Die Berechnung solcher Spurstrukturen basiert derzeit meist auf den Wechselwirkungsdaten, die durch Messungen an Biomolekülen in der Gasphase gewonnen wurden. Phaseneffekte, d. h. eine mögliche Änderung der Wechselwirkungsquerschnitte beim Übergang vom gasförmigen zum flüssigen Zustand, werden bislang durch einfache theoretische oder semiempirische Modellrechnungen berücksichtigt. Diese Modelle erlauben jedoch lediglich eine grobe Abschätzung der Phaseneffekte von integralen Elektronenstreu- und Ionierungsquerschnitten.

Experimentelle Untersuchungen mittels Liquid-microjet photoelectron spectroscopy zeigen allerdings eine deutliche Phasenabhängigkeit nicht nur der absoluten Intensität, sondern auch der Winkelverteilung der emittierten Elektronen. Deshalb wurde ein Programm erstellt, das die Berechnung mehrfach differentieller Ionierungsquerschnitte von Biomolekülen in verschiedenen Aggregatzuständen durch Elektronen ermöglicht. Die Genauigkeit der berechneten Daten kann anhand der experimentellen Daten in der Gasphase überprüft werden.

Als ein Beispiel zeigt Bild 3 die berechneten einfach differentiellen Ionierungsquerschnitte  $d\sigma_i/d\Omega$  von Tetrahydrofuran (THF) für Elektronen mit einer Primärenergie von 200 eV als Funktion des Emissionswinkels. Zum Vergleich sind experimentelle Daten eingefügt. Die theoretische Winkelverteilung für gasförmiges THF gibt die experimentellen Daten im Rahmen der Unsicherheit gut wieder. Aus der Abbildung geht weiterhin hervor, dass der Ionierungsquerschnitt von hydratisiertem THF für 200-eV-Elektronen im Mittel etwa 8 % höher als der von gasförmigem THF ist. Außerdem werden die Sekundärelektronen bei hydratisiertem THF ten-

Bild 3: Einfach differentielle Ionisierungsquerschnitte  $d\sigma/d\Omega$  von Tetrahydrofuran für 200-eV-Elektronen als Funktion des Sekundärelektronenemissionswinkels: (•) experimentelle Daten, (—) mithilfe der PWIA-Näherung berechnete Werte, (---) Verhältnis des einfach differentiiellen Ionisierungsquerschnitts von hydratisiertem THF zu dem von gasförmigem THF



denziell bei größeren Winkeln als bei gasförmigem THF emittiert.

## Direkte Messung strahlungsinduzierter DNS-Schäden

Zur Abschätzung von Strahlenschäden der DNS werden vorrangig Monte-Carlo-Simulationen genutzt. Diese Simulationen stützen sich auf Datensätze verschiedener Wirkungsquerschnitte für die Wechselwirkung zwischen Strahlungsteilchen und DNS-Bausteinen, z. B. Ionisierungsquerschnitte oder Fragmentierungsquerschnitte. Zur Messung dieser Größen werden die zu untersuchenden Proben zumeist in die Gasphase überführt. Dadurch geht in die nachfolgenden Simulationen implizit die vereinfachende Annahme ein, dass der Aggregatzustand und die Bindungsumgebung der DNS-Konstituenten keinen Einfluss auf das Wechselwirkungsverhalten haben.

Zur möglichst realitätsnahen Quantifizierung der Strahlenschäden wurde der Versuch unternommen, die Schäden direkt am radiosensitiven Target, der DNS, zu bestimmen. Realisiert wird eine solche Messung durch dielektrische Spektroskopie an DNS-Molekülsträngen während der Bestrahlung. Dazu werden DNS-Molekülstränge mittels Nanostrukturen elektrisch kontaktiert. Mit Lock-In-Verstärkern wird die Impedanz eines solchen Systems über einen großen Frequenzbereich charakterisiert. Es zeigt sich, dass intakte DNS-Moleküle die Charakteristik eines ohmschen Bauelements besitzen (Bild 4). Wird eine Probe bestrahlt, so wächst der kapazitive Charakter der Probe kontinuierlich an, was auf das zunehmende Schadensmaß der DNS-Molekülstränge zurückzuführen ist.

Bild 5 zeigt die Impedanzänderung der Proben, die mit 4,5-MeV- $\alpha$ -Teilchen aus einer umschlossenen  $^{241}\text{Am}$ -Quelle bzw. mit 8-MeV- $\alpha$ -Teilchen

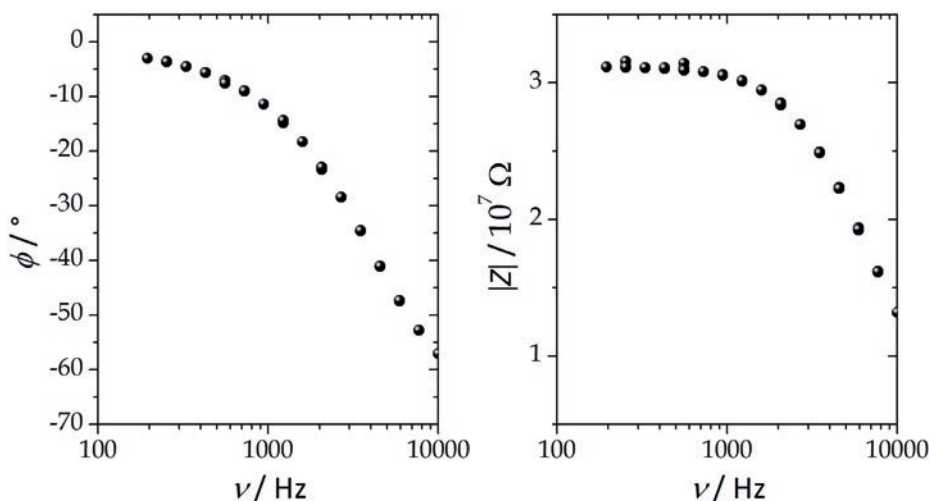
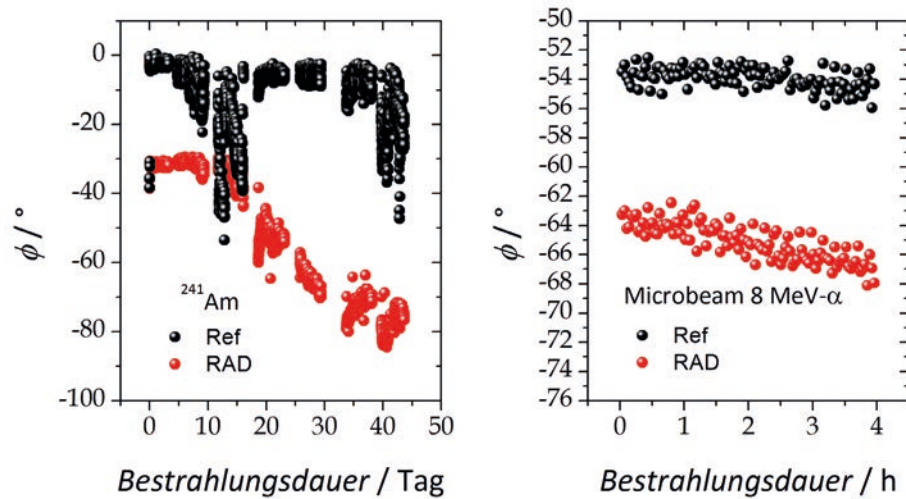


Bild 4: Im linken Diagramm ist der gemessene Phasenverlauf  $\phi$ , im rechten Diagramm der Betrag der Impedanz  $|Z|$  eines Widerstandsbauelements mit nominell 30 MW gegen die Frequenz  $\nu$  aufgetragen. Es lässt sich erkennen, dass in dem Frequenzbereich von 190 Hz bis 2 kHz der ohmsche Charakter erhalten bleibt und der Betrag der Impedanz innerhalb der 10 %-igen Widerstandstoleranz liegt.



am Mikroionenstrahl der Ionenbeschleunigereinrichtung PIAF der PTB bestrahlt wurden. Bei allen Messungen wird eine zuvor charakterisierte Vergleichsprobe in räumlicher Nähe, aber außerhalb des Strahlungsfeldes vor, während und nach der Bestrahlung beobachtet. Im direkten Vergleich beider Proben konnte bisher immer eine Zunahme des kapazitiven Charakters der bestrahlten Probe beobachtet werden. Zur genauen Quantifizierung des Schadensmaßes werden weitere Messungen mit unterschiedlichen Nanostrukturen zur elektrischen Kontaktierung angestrebt.

Bild 5: In beiden Diagrammen sind jeweils die Phasen  $\Phi$  von Vergleichsprobe (Ref) und bestrahlter Probe (RAD) gegen die Bestrahlungsdauer aufgetragen. Das linke Diagramm zeigt einen Dauerversuch mit einer  $^{241}\text{Am}$ -Quelle. Die Quelle befand sich ca. 2 cm oberhalb der DNS-Molekülstränge. Im rechten Diagramm wird das Vergleichsexperiment mit dem Mikroionenstrahl gezeigt. Hier befand sich das Strahlaustrittsfenster weniger als 8 mm oberhalb der DNS-Molekülstränge. Beide Experimente zeigen eine Zunahme des kapazitiven Charakters der jeweils bestrahlten Probe. Die Phasen wurden aus dem Frequenzbereich von 190 Hz bis 2500 Hz ermittelt, für welchen die ohmsche Vergleichsprobe in Bild 4 Impedanzwerte innerhalb der spezifizierten Widerstandstoleranz hat.

# In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

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

## Grundlagen der Metrologie

### **Gammaskpektrometrie zur Darstellung der Aktivität: Zukunftskonzept und Resultate der Machbarkeitsanalyse**

Grundlage einer jeden Ausgabe von Quellen (Lösung oder Festpräparat) an Kunden ist die Aktivitäts- und Verunreinigungsbestimmung. Die Gammaskpektrometrie ist ein wichtiges Standbein des Fachbereiches Radioaktivität zur Weitergabe der Aktivität neben LSC und Ionisationskammermessungen. Entscheidend ist jedoch, dass die Gammaskpektrometrie das einzige Verfahren ist, das in der Lage ist, Verunreinigungen zu erkennen und Radionuklidgemische zu quantifizieren. Damit kommt ihr eine Schlüsselrolle im hochfrequentierten Dienstleistungsbetrieb des Fachbereiches zu. (A. Röttger, FB 6.1, [annette.roettger@ptb.de](mailto:annette.roettger@ptb.de))

### **Puls aufgelöste Bestimmung der Ladung des Elektronenstrahls am Forschungs-Elektronenbeschleuniger der PTB**

Der Forschungs-Elektronenbeschleuniger der PTB ist ein Linearbeschleuniger (LINAC), der nach den gleichen Prinzipien wie die in der Strahlentherapie eingesetzten medizinischen LINACs arbeitet. Dabei wird zur Erzeugung hochenergetischer Photonenstrahlung ein gepulster Elektronenstrahl mit einer Energie im Bereich von 0,5 MeV bis 50 MeV auf ein Metall-Target gelenkt (Erzeugung von Röntgen-Bremsstrahlung). Eine entscheidende Größe ist dabei die Ladung der Elektronen-Pulse, welche direkt proportional zur Dosis der erzeugten Photonenstrahlung ist. Es wurden Messeinrichtungen und -verfahren entwickelt, um die Ladung jedes Elektronenstrahl-Pulses rückführbar und mit einer relativen Messunsicherheit von ca. 0,1 % zu bestimmen. (A. Schüller, FB 6.2, [andreas.schueller@ptb.de](mailto:andreas.schueller@ptb.de), R.-P. Kapsch, FB 6.2, [ralf-peter.kapsch@ptb.de](mailto:ralf-peter.kapsch@ptb.de))

### **Simulation der Neutronenantwortfunktion von Diamantdetektoren**

Detektoren aus künstlich hergestelltem ein-kristallinem Diamant sind als Spektrometer für schnelle Neutronen für den Einsatz in extremen Neutronenflüssen geeignet. Für die Verwendung von Diamantdetektoren zur Diagnostik an Fusionsplasmen ist die Kenntnis der Antwortfunktion der Detektoren in einem breiten Neutronenenergiebereich notwendig. Mit einer modifizierten Version des Monte-

Carlo-Teilchentransportprogramms NRESP, das ursprünglich an der PTB für die Berechnung der Antwortfunktion von Szintillationsdetektoren entwickelt worden war, wurden die Antwortfunktionen für Diamantdetektoren im Energiebereich von  $7 \text{ MeV} < E_n < 16 \text{ MeV}$  berechnet. Die berechneten Antwortfunktionen wurden mit Messungen von quasi-monoenergetischen Neutronen verglichen, die an der PTB-Ionenbeschleunigeranlage durchgeführt wurden. (M. Zboril, FB 6.4, [miroslav.zboril@ptb.de](mailto:miroslav.zboril@ptb.de))

### **Die doppelt-differentielle Neutronenausbeute der Reaktion ${}^9\text{Be}+d$ bei einer Deuteronenenergie von 3 MeV**

Quellterm für thermischen Standard des NPL bestimmt. (R. Nolte, FB 6.4, [ralf.nolte@ptb.de](mailto:ralf.nolte@ptb.de))

### **Phaseneffekte der Elektronen-Wechselwirkungsquerschnitte von Biomolekülen**

Elektronenstoßinduzierte mehrfach differentielle Ionisierungsquerschnitte von Biomolekülen in verschiedenen Aggregatzuständen können mithilfe eigens entwickelter Software berechnet werden. (W.Y. Baek, FB 6.6, [woonyong.baek@ptb.de](mailto:woonyong.baek@ptb.de))

### **Parametrisierung der Wirkungsquerschnitte von DNA-Molekülen für Protonenstoß**

Kürzlich an der PTB gemessene Wirkungsquerschnitte für Protonenstoß auf DNA-Moleküle wurden für die Implementierung in Spurstruktur-Simulationscodes parametrisiert. (M. Bug, FB 6.6, [marion.bug@ptb.de](mailto:marion.bug@ptb.de))

### **Doppelt-differentieller Wirkungsquerschnitt für Ionisierung von Tetrahydrofuran durch Protonenstoß**

(In Winkel und Energie) doppelt-differentielle Ionisierungsquerschnitte wurden experimentell für die Wechselwirkung von Protonen mit einem Tetrahydrofuran-Gastarget bei Primärenergien zwischen 100 keV und 1910 keV im Winkelbereich zwischen  $15^\circ$  und  $165^\circ$  relativ zur Strahlrichtung bestimmt. Die erhaltenen absoluten doppelt-differentiellen Ionisierungsquerschnitte wurden in den PTB-Spurstrukturcode PTra und im Rahmen des EMRP-Projekts BioQuaRT entwickelte Multiskalen-Spurstruktur-Simulationsprogramm eingebaut, welches auf GEANT4 basiert. (T. Buhr, FB 6.6, [ticia.buhr@ptb.de](mailto:ticia.buhr@ptb.de))



## **Ionisierungsquerschnitte von DNS-Bausteinen für Protonen im Energiebereich des Braggpeaks**

Doppelt-differentielle Ionisationsquerschnitte für drei chemische Analoga der DNS-Bausteine (Tetrahydrofuran, Trimethylphosphat und Pyrimidin) wurden für Protonenenergien in der Bragg-Peak-Region für die Verbesserung von Spurstruktursimulationen gemessen. (B. Rudek, FB 6.6, benedikt.rudek@ptb.de)

## **Doppelt-differentielle Ionisierungsquerschnitte von Tetrahydrofuran für Protonen im Energiebereich zwischen 0,3 MeV und 3 MeV**

Doppelt-differentielle Wirkungsquerschnitte für die Ionisierung von Tetrahydrofuran durch Protonenstoß wurden mittels Elektronenspektroskopie an Ionenbeschleunigeranlagen der PTB gemessen. (M. Wang, FB 6.6, mingjie.wang@ptb.de)

## **Dissoziation von biologisch relevanten Molekülen durch Elektronenanlagerung**

Ein neues Anionen-Impulsspektrometer ermöglicht detaillierte Untersuchungen der Dissoziation von Molekülen und hilft damit beim Verständnis eines wichtigen Prozesses, welcher für die Entstehung von Strahlenschäden verantwortlich ist. (M. Weyland, FB 6.6, marvin.weylend@ptb.de)

## **Metrologie für die Wirtschaft**

### **Machbarkeitsstudie „Massenspektrometrische Radionuklidmessungen für Umweltproben-Referenzmaterialien“ erstellt.**

Die PTB ist Referenzwertgeber bei nationalen und internationalen Vergleichsmessungen zur Überwachung der Umweltradioaktivität. Der Fachbereich Radioaktivität hat 2015 ein Konzept zur Einführung der Massenspektrometrie als zukunftsweisendes Messverfahren erstellt. (H. Wershofen, FB 6.1, herbert.wershofen@ptb.de)

### **Wiederaufnahme der Alphaspektrometrie zur Darstellung der Aktivität**

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

## **Metrologie für die Gesellschaft**

### **Dosimetrie an kombinierten MR-Bestrahlungsgeräten**

Eine neue Entwicklung in der modernen Strahlentherapie besteht darin, das Bestrahlungsgerät mit einem Magnetresonanztomografen (MRT) als bildgebendes System in einem Gerät zu kombinieren. Diese Form der MR-geführten Strahlentherapie bringt eine Reihe neuer Herausforderungen im Bereich der Medizinphysik und -technik mit sich und betrifft auch die Dosimetrie an diesen Geräten. Der Fachbereich 6.2 *Dosimetrie für die Strahlentherapie und Röntgendiagnostik* befasst sich seit kurzem mit Fragestellungen zur Dosimetrie für die MR-geführte Strahlentherapie und hat dazu u. a. einen Projektantrag bei der DFG gestellt, der Untersuchungen mit Alanin/ESR (Elektronen-Spin-Resonanz) als Dosimetriesystem für kombinierte MR-Bestrahlungsgeräte beinhaltet. (F. Renner, FB 6.2, franziska.renner@ptb.de)

### **Einfluss der Selbstabsorption auf die Dosisleistung einer $^{60}\text{Co}$ -Quelle**

Für die Dosimetrie in der Strahlentherapie werden vorzugsweise Ionisationskammern eingesetzt, die bei  $^{60}\text{Co}$ -Strahlung zur Anzeige der Messgröße „Wasser-Energiedosis“ kalibriert sind. Diese Kalibrierungen sind rückführbar auf ein an der PTB vorhandenes Primärnormal (Wasserkalorimeter), das an einer  $^{60}\text{Co}$ -Bestrahlungsanlage betrieben wird. Fortlaufende Messungen mit dem Wasserkalorimeter zeigen eine geringfügige Abnahme der Wasser-Energiedosisleistung um ca. 0,12 %. Dieser Effekt kann durch die Selbstabsorption der  $^{60}\text{Co}$ -Strahlung in der Quelle erklärt werden. Entsprechende Berechnungen zeigen eine gute Übereinstimmung mit den Messdaten. Für zukünftige Kalibrierungen wird der ursprüngliche Wert der Dosisleistung entsprechend korrigiert. (A. Krauss, FB 6.2, achim.krauss@ptb.de)

### **Messung der Dosisbelastung der kontralateralen Brust während einer VMAT-Bestrahlung beim Mamma-Karzinom**

Am Universitätsklinikum Göttingen wurden Alanin-Dosimeter eingesetzt, um die Dosisbelastung der gesunden Brust bei Bestrahlungen des Mamma-Karzinoms zu untersuchen. Bei Untersuchungen am Phantom wurde eine sehr gute Übereinstimmung zwischen geplanter und gemessener Dosis beobachtet. Bei den vier untersuchten Patientinnen war die Übereinstimmung befriedigend. Die größeren Abweichungen bei den In-vivo-Messungen sind vermutlich auf Unsicherheiten der Sondenposition

(Atmung) zurückzuführen. (M. Anton, FB 6.2, mathias.anton@ptb.de)

### **Zweidimensionale Dosismessungen mit einem Speicherfoliensystem für die externe Strahlentherapie**

Speicherfoliensysteme ermöglichen räumlich hochaufgelöste, zweidimensionale Dosismessungen von Strahlungsfeldern über einen mehrere Größenordnungen umfassenden Dosisbereich. Diese Eigenschaften machen Speicherfolienmessungen interessant für die Qualitätssicherung in der externen Strahlentherapie und für grundlegende Fragestellungen in der Dosimetrie kleiner und komplexer Felder. Ein kommerzielles Speicherfoliensystem (Kodak ACR-2000i) wurde umfassend charakterisiert. Relative Dosismessungen mit Unsicherheiten von 1 bis 2 % können unter geeigneten Bedingungen realisiert werden. (C. Aberle, FB 6.2, christoph.aberle@ptb.de; R.-P. Kapsch, FB 6.2, ralf-peter.kapsch@ptb.de)

### **Berechnung der Organdosis von Patienten für unterschiedliche Quellenmodelle eines medizinischen Computertomografen**

Die Berechnung der effektiven Dosis eines Patienten nach einer computertomografischen Untersuchung erfordert die genaue Kenntnis der Röntgenquelle des verwendeten Computertomografen. Aus Wettbewerbsgründen werden derartige Daten von den Herstellern streng geheim gehalten. Die PTB hat Methoden etabliert, um aus Messungen im Röntgenstrahl eines Computertomografen auf äquivalente Quellenmodelle zu schließen. Im Rahmen einer Masterarbeit wurde jetzt untersucht, ob derartige Quellenmodelle auch für die Berechnung von effektiven Patientendosen genügend gut geeignet sind. (L. Büermann, FB 6.2, ludwig.bueermann@ptb.de)

### **Programm zur Bestimmung der Dosisleistung durch Betastrahler**

Es wurde ein Java-Programm zur Bestimmung der Dosisleistung durch Betastrahler zur Verfügung gestellt. Damit kann die Dosisleistung durch Strahlungsquellen mit unterschiedlichen Beta-Endpunktenergie, beliebigem Durchmesser und in unterschiedlichen Abständen bestimmt und grafisch angezeigt werden. Das Programm ist auf der Webseite der PTB verfügbar. (R. Behrens, FB 6.3, rolf.behrens@ptb.de)

### **EURADOS-Messvergleich für passive $H^*(10)$ -Ortsdosimeter**

Der erste internationale Messvergleich für passive  $H^*(10)$ -Ortsdosimeter wurde auf den Referenz-Messplätzen für Umgebungsstrahlung der PTB durchgeführt, um passive Ortsdosimetriesysteme von europäischen Messstellen zu testen. Derartige Systeme werden häufig zur Überwachung nuklear-technischer Anlagen verwendet. Die für die Qualitätssicherung der beteiligten Messstellen wichtigen Resultate sind insgesamt vielversprechend. (H. Dombrowski, FB 6.3, harald.dombrowski@ptb.de)

### **Messvergleich von Spektro-Dosimetrie-Systemen für die Umgebungsüberwachung**

Im Rahmen eines EMRP-Projekts wurden Szintillationsdetektoren, die gleichzeitig als Spektrometer und Dosimeter für die Umgebungsüberwachung dienen sollen, auf den Referenzmessplätzen der PTB für die Dosimetrie bei niedrigen Dosisleistungensystematisch bezüglich ihrer Eigenschaften untersucht. (S. Neumaier, FB 6.3, stefan.neumaier@ptb.de; H. Dombrowski, FB 6.3, harald.dombrowski@ptb.de)

### **Direkte Messung strahlungsinduzierter DNS-Schäden**

Leitfähigkeitsänderung der DNS infolge strahlungsinduzierter Schäden wurde gemessen. (A. Arndt, FB 6.6, alexander.arndt@ptb.de)

### **Monte-Carlo-Simulationen zur Abschätzung potenzieller DNA-Schädigung bei Strahlentherapie in Magnetfeldern**

Der Einfluss eines externen Magnetfeldes auf die Spurstruktur therapeutischer Strahlungsfelder wurde mit Hilfe von Monte-Carlo-Simulationen untersucht und zeigte eine nicht-signifikante Änderung der Teilchenspuren in nanometrischen Dimensionen auf Ebene der DNA. (M. Bug, FB 6.6, marion.bug@ptb.de)

### **Messung und Simulation der ortsabhängigen Nachweiswahrscheinlichkeit des PTB-Nanodosimeters unter Einbeziehung von Driftzeitfenstern.**

Messungen und Simulationen der Zielvolumina des PTB-Nanodosimeters für verschiedene Driftzeitfenster wurden verglichen. Der Vergleich der zentralen Bereiche mit hoher mittlerer Ionisationsclustergröße bzw. Nachweiswahrscheinlichkeit zeigt eine insgesamt gute Übereinstimmung. (G. Hilgers, FB 6.6, gerhard.hilgers@ptb.de)

### **Die Auswirkungen sekundärer Ionisationen auf den Vergleich gemessener und simulierter Spurstrukturparameter in nanometrischen Volumina**

Die Einbeziehung des Sekundärionenuntergrundes in die Simulation der Häufigkeitsverteilungen von Ionisationsclustergrößen führt zu einer signifikant verbesserten Übereinstimmung zwischen Messungen und Simulationen. (G. Hilgers, FB 6.6, gerhard.hilgers@ptb.de)

### **Messung des Bremsvermögens von flüssigem Wasser für Kohlenstoffionen**

Das Bremsvermögen von flüssigem Wasser für Kohlenstoffionen mit Energien im Bereich des maximalen Bremsvermögens wurde mithilfe der Inverted-Doppler-Shift-Attenuation-Methode ermittelt. (J. Rahm, FB 6.6, johannes.rahm@ptb.de)

### **Internationale Angelegenheiten**

#### **Kooperation mit dem NIM bei Vergleichsmessungen zur Alphaspektrometrie**

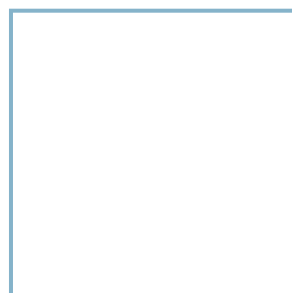
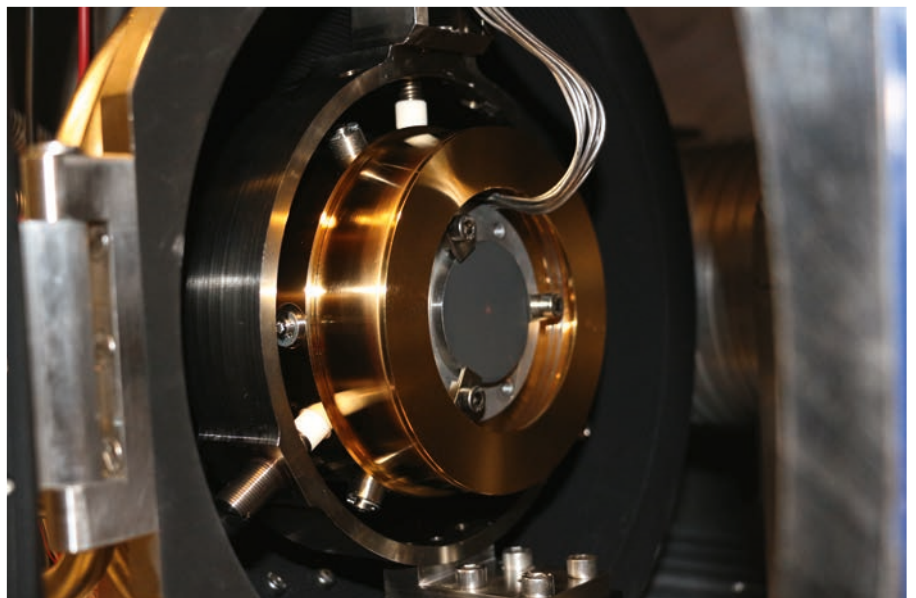
Im Rahmen eines Besuchs einer chinesischen Delegation wurde eine Vergleichsmessung mit dem National Institute of Metrology (NIM) bzgl. elektrolytisch abgeschiedener Präparate mit alphastrahlenden Nukliden für 2018 vereinbart. (A. Röttger, FB 6.1, annette.roettger@ptb.de)





# Abteilung 7

## Temperatur und Synchrotronstrahlung



## Institut Berlin

Das Institut Berlin der PTB hat einen Masterplan für die städtebauliche, infrastrukturelle und architektonische Weiterentwicklung seines denkmalgeschützten Campus aufgestellt. Ein wesentlicher Schritt zur Umsetzung dieses Plans ist die Errichtung des Walther-Meißner-Baus, der den auffälligen Warburgbau flächenmäßig großteils ersetzen und hochwertige Arbeitsmöglichkeiten für die Thermometrie und Kryosensorik bieten wird (Bild 1). Verteilt auf Keller und drei Nutztagen wird eine Nutzfläche von gut 2100 m<sup>2</sup> mit höchstwertig ausgestatteten Labor- und Messräumen verfügbar sein. Nach jetziger Planung soll mit dem Aushub der Baugrube Ende 2016 begonnen und das fertige Gebäude 2019 an die PTB übergeben werden.



Bild 1: Fassadenentwurf des geplanten Walther-Meißner-Baus der PTB in Berlin-Charlottenburg

Am 13. Juni 2015 fand in Berlin zum fünfzehnten Mal die Lange Nacht der Wissenschaften statt. Neben vielen Wissenschaftseinrichtungen öffnete auch das Institut Berlin der PTB seine Tore. Getreu der PTB-Kernkompetenz wurde an zwölf Stationen über verschiedenste Aspekte der Metrologie informiert, angefangen vom Begriff der Metrologie und seiner Bedeutung über Temperatur- und Magnetfeldmessung bis zur medizinischen Bildgebung. Die Infostände und Laboratorien der PTB waren mit etwa 700 interessierten Besuchern völlig ausgelastet (Bild 2).

Titelbild:

Emissionsgradprobenhalter für Oberflächentemperaturen bis 1000 °C



Bild 2: Besucher an der Station zur Internationalen Temperaturskala während der Langen Nacht der Wissenschaften

## Abteilung 7 Temperatur und Synchrotronstrahlung

Die Abteilung *Temperatur und Synchrotronstrahlung* konnte ihr vielfältiges Dienstleistungsangebot auf den Gebieten Thermometrie, Radiometrie, Messung thermischer Energie, Vakuum- und Nanometrologie und Spektrometrie weiter ausbauen. Ihre teilweise weltweit einmaligen Mess- und Prüfanlagen, wie z. B. die Wärmehäufigkeits-Prüfanlage oder die Laboratorien an den Elektronenspeicherringen BESSY II und *Metrology Light Source* (MLS) in Berlin-Adlershof, werden in einer hohen Anzahl von Kooperationen genutzt, sowohl PTB-intern als auch zusammen mit der Industrie, mit Forschungseinrichtungen und Universitäten.

Nachfolgend werden einige ausgewählte Ergebnisse und Entwicklungen vorgestellt.

### Metrologie mit Synchrotronstrahlung

Umfangreiche Kooperationen mit externen Partnern aus Forschung und Industrie bestimmen seit vielen Jahren die Arbeiten der PTB an den Synchrotronstrahlungsquellen BESSY II und MLS (Bild 3). Zurzeit entsteht im PTB-Laboratorium bei BESSY II mit Mitteln der Europäischen Raumfahrtbehörde ESA ein neues Strahlrohr zur Charakterisierung von Optiken für die zukünftige Röntgenmission ATHENA. An der MLS wurde ein für das Instrument SUMER der ESA-Mission SOHO entwickeltes Transferstrahlernormal (SUMER-Quelle) durch den Einsatz von Multilayer-Optiken für die Cha-





Bild 3: Messplätze an der Metrology Light Source (MLS)

rakterisierung von Sonnenteleskopen zukünftiger Missionen (Solar Orbiter, Solar C) weiterentwickelt.

Die wichtigsten Industriekooperationen beziehen sich nach wie vor auf die Untersuchung von Optiken für die EUV-Lithografie (Extrem-Ultraviolet-Lithografie, EUVL). Mit 41 Partnern insbesondere aus der europäischen Halbleiterindustrie und einem Gesamtvolumen von über 30 Millionen Euro beteiligt sich die PTB unter anderem an einem neuen EU-Projekt zur *Seven Nanometer Technology* (SeNaTe). Zwei PTB-Größtgeräte zur EUV-Bestrahlung und zur orts aufgelösten EUV-Reflektometrie, deren Aufbau weit fortgeschritten ist, werden die Messmöglichkeiten wesentlich erweitern. Ein großes EUV-Reflektometer mit schmiermittelfreier Mechanik und ein Messplatz zur Untersuchung von EUV-Lithografiemasken folgen in den nächsten Jahren. Bild 4 zeigt die etwa 120 Teilnehmer des 290.

PTB-Seminars, das sich Anfang November 2015 zum dritten Mal der VUV- und EUV-Metrologie widmete, mit den Schwerpunkten Raumfahrtinstrumentierung und EUVL, und den Großteil der PTB-Kooperationspartner zu diesen Themen am Institut Berlin in Charlottenburg zusammenführte. Neben den verschiedenen Methoden der Entwicklung und Charakterisierung von Präzisionsoptiken und deren Anwendungen rückt hier mehr und mehr auch die Untersuchung von Materialien und Oberflächen in den Vordergrund.

Neben der Charakterisierung nanostrukturierter Oberflächen liegt ein weiterer Schwerpunkt der Nanometrologie durch Röntgenkleinwinkelstreuung mit Synchrotronstrahlung bei der rückführ-

Bild 4: Teilnehmer des 290. PTB-Seminars zur VUV- und EUV-Metrologie



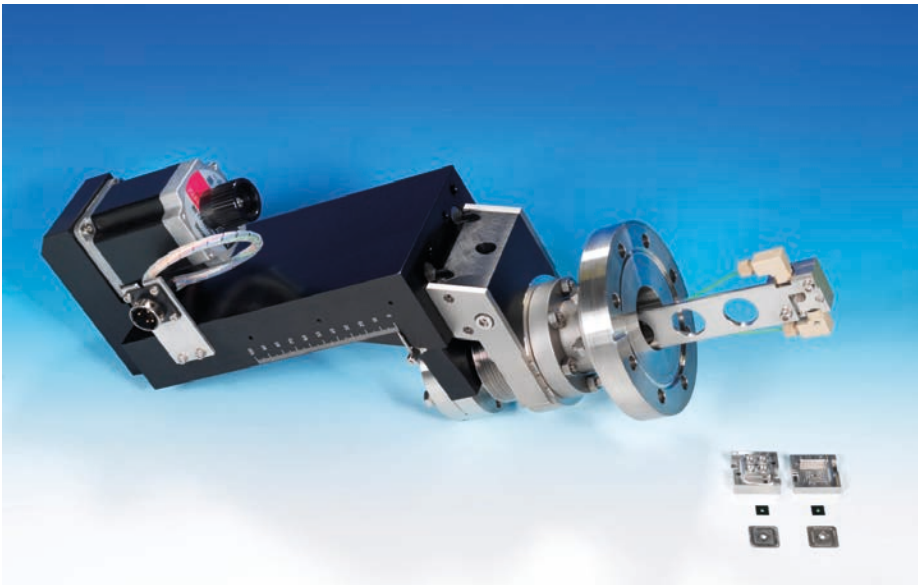


Bild 5: Durchflusszelle zur Untersuchung von flüssigen Proben mit Röntgenkleinwinkelstreuung

baren Bestimmung von Nanopartikelgrößen. Die Forschungsarbeiten hierzu in den letzten Jahren mündeten kürzlich in einen entsprechenden Eintrag des *Bureau International des Poids et Mesures* (BIPM) zu den *Calibration and Measurement Capabilities* (CMCs) und unter Federführung der PTB in einen neuen ISO-Standard 17867:2015 *Particle size analysis – Small-angle X-ray scattering*. Derzeitige Forschungsarbeiten beziehen sich auf die Größenbestimmung von Nanopartikeln mit Röntgenkleinwinkelstreuung in biologischer Umgebung, wofür im Rahmen einer Bachelorarbeit an der Beuth Hochschule für Technik Berlin auch eine neue Durchflusszelle entwickelt wurde (Bild 5).

Einen Vorstoß in den Subnanometerbereich bedeuten die kürzlich in *Nature Communications* DOI (10.1038/NCOMMS9287) veröffentlichten Arbeiten zur Rekonstruktion von Molekülorbitalen in drei

Dimensionen durch winkelaufgelöste Elektronenspektroskopie in Zusammenarbeit mit der Universität Graz und dem Forschungszentrum Jülich (siehe Nachrichten des Jahres). Sie stehen im Zusammenhang mit Kooperationen zur Material- und Oberflächenmetrologie am Undulatorstrahlrohr der MLS mit verschiedenen Methoden und verschiedenen externen Partnern.

An der MLS wird ein Infrarot-Streulichtnahfeldmikroskop betrieben, dessen Nachweisempfindlichkeit für dünne organische Schichten durch eine gemeinsam mit dem Helmholtz-Zentrum Berlin entwickelte neue Speicherringoptik signifikant erhöht werden konnte. Mit der FU Berlin wurde die Kopplung zwischen  $\text{SiO}_2$ -Phononmoden und -Plasmonmoden von nanostrukturierten  $\text{MoS}_2$ -Mono- und -Bilagen sowie mit Abteilung 2 die kontaktlose na-

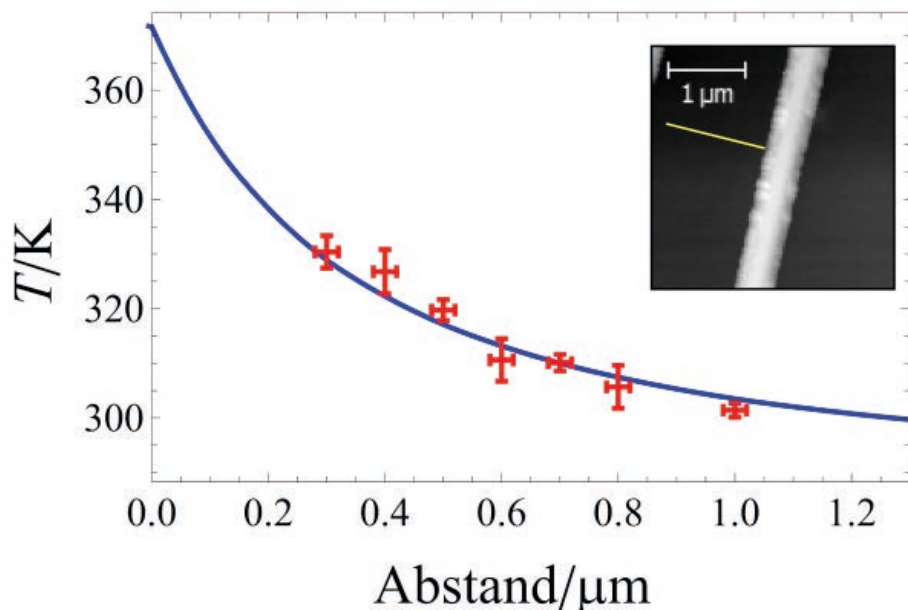


Bild 6: Temperaturverlauf entlang der im Bild gezeigten gelben Linie, senkrecht zu einem Heizdraht auf  $\text{SiO}_2$ . Der blaue Diagrammverlauf zeigt eine Simulation, die gemessenen Werte sind in Rot dargestellt.



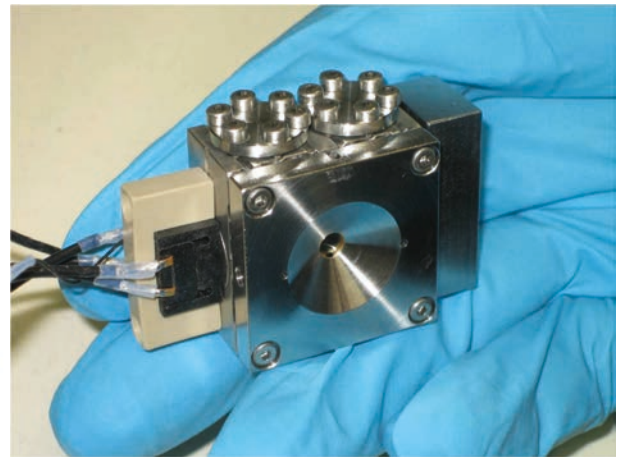
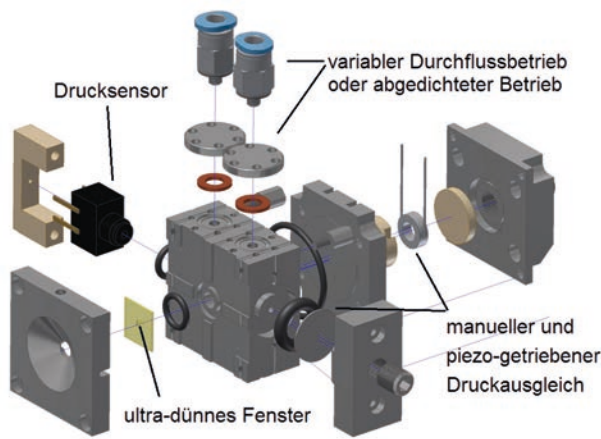


Bild 7: Explosionszeichnung und Foto einer für die Infrarot- und Röntgenanalytik geeigneten Flüssigkeitszelle

noskalige Temperaturmessung durch Verschiebung oberflächennaher Phononenbanden belegt (Bild 6).

Die In-situ-Charakterisierung von Proben und Grenzflächen in flüssigen und gasförmigen Umgebungen erhöht das Verständnis chemischer sowie elektrochemischer Prozesse. Durch Röntgenspektrometrie werden Massenbelegungen und Bindungszustände beteiligter Elemente unter Ultrahochvakuum-Bedingungen ermittelt, welche die Trennung der flüssigen oder gasförmigen Probenumgebung durch dünne Fenster erfordern. Gemeinsam mit der TU Berlin wurde dafür eine Messzelle mit Druckausgleich entwickelt (Bild 7).

Die tiefenabhängige Analyse des chemischen Bindungszustandes von Nanoschichten kann durch eine geeignete Kopplung der Röntgenspektrometrie un-

ter streifendem Einfall und der Nahkantenabsorptionsfeinstruktur-Spektroskopie (NEXAFS) erreicht werden. Für Titanoxidschichten unterschiedlicher chemischer Bindung konnte dieses zerstörungsfreie Verfahren belegt werden (Bild 8).

### Kryosensorik

Der Fachbereich 7.2 *Kryophysik und Spektroskopie* entwickelt derzeit gemeinsam mit dem Fachbereich 8.2 *Biosignale* ein neues Mehrkanal-SQUID-Magnetometer-System. Dieses Messsystem wird zukünftig im BMSR2, dem weltweit magnetisch bestgeschirmten Raum, zur Entwicklung höchstempfindlicher biomagnetische Messverfahren für die medizinische Diagnostik und Pharmakokinetik eingesetzt. Im April 2015 wurde der Prototyp eines Sensormoduls mit 18 SQUID-Magnetometern, bestehend aus SQUIDS der Sensorfamilie PTB-C7 gekoppelt mit zwei Typen drahtgewickelter Flussantennen, fertiggestellt (siehe Bild 9). Mit den Magnetometern werden intrinsische Feldrauschwerte von  $0,52 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$

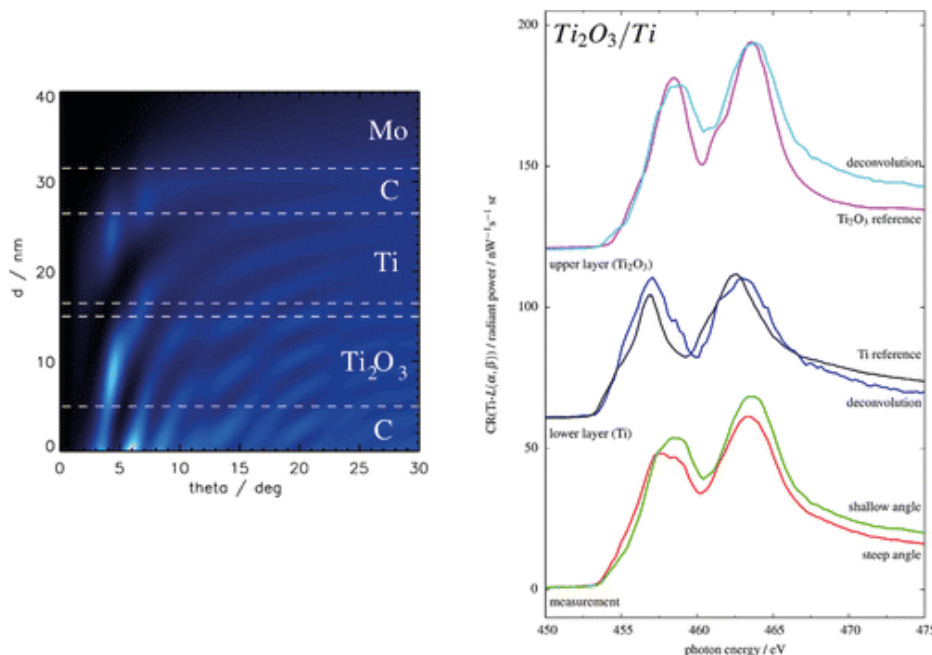


Bild 8: Links: Berechnete tiefenabhängige Feldverteilung in einer Nanoschichtprobe. Rechts: Ti-L<sub>III,II</sub> NEXAFS-Spektren zur Ermittlung des Speziationstiefenprofils

bzw.  $0,16 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$  erreicht. Das Messsystem soll in der weltweit einzigartigen Messumgebung des BMRS2 auch für Ultra-Niedrigfeld-NMR (Nuclear Magnetic Resonance) einsetzbar sein. Im Rahmen des PTB-Technologietransfers wird die Firma Magnicon GmbH befähigt, im Laufe des nächsten Jahres drei weitere Sensormodule für das Messsystem herzustellen.

Die Bündelung von Kompetenzen der Abteilung 2 in Braunschweig im Bereich der Nanotechnologie supraleitender Schaltungen und der SQUID-Entwicklung und Messtechnik in der Abteilung 7 in Berlin hat zur Entwicklung neuer Nano-SQUIDs geführt. Diese Zusammenarbeit soll in Zukunft intensiviert und auch im Bereich konventioneller SQUID-Technologie weiter ausgebaut werden.

### Thermometrie

Die Aktivitäten in der Thermometrie standen ganz im Zeichen der für 2018 geplanten Neudefinition der Temperatureinheit Kelvin. Im Mai 2015 fand dazu in Chicheley Hall, Buckinghamshire, UK, der Royal Society-Workshop „Towards implementing the new kelvin“ statt. Die PTB konnte mit vier eingeladenen Vorträgen ein Viertel des Workshop-Programms bestreiten. Der Entwicklungsstand primärthermometrischer Methoden zur Messung thermodynamischer Temperaturen im Bereich von über 1300 K bis in den Millikelvinbereich sowie die Abweichungen der aktuellen Temperaturskalen ITS-90 und PLTS-2000 von der thermodynamischen Temperatur wurden diskutiert.

Um auch im Bereich unmittelbar oberhalb des Wassertripelpunktes thermodynamische Temperaturen zur Darstellung des neuen Kelvins mit ausreichend kleiner Unsicherheit messen zu können, benötigt die PTB neben der Dielektrizitätskonstanten-Gas-thermometrie ein weiteres leistungsstarkes Primärthermometer. Als Methode mit besonders hohem Entwicklungspotential wurde die Rauschthermometrie ausgewählt, die auf der Messung des statistischen Spannungsrauschens eines Widerstandes beruht und bei hohen Temperaturen mit der absoluten Strahlungsthermometrie überlappt. Verschiedene Fachbereiche in den Abteilungen 7 *Temperatur und Synchrotronstrahlung* und 2 *Elektrizität* werden zu diesem sehr anspruchsvollen Projekt beitragen.

Das von der PTB entwickelte Magnetfeld-Fluktuationsthermometer hat sich als praktisches Tieftemperaturthermometer für den Temperaturbereich von 4 K bis ins Millikelvingebiet bewährt. Es ist gelungen, daraus eine primäre Methode zu entwickeln (Bild 10). Damit steht nach der Neudefinition des Kelvins auch im Bereich der PLTS-2000 ein primäres Rauschthermometer zur direkten Messung thermodynamischer Temperaturen zur Verfügung.

Zur Verbesserung des Kalibrierangebots von Hochtemperatur-Normalthermometern wurde im Jahr 2014 ein Messplatz für Kalibrierungen an den Fixpunkten der ITS-90 in Betrieb genommen. Dieser ist um einen druckgeregelten Wärmerohrfen ergänzt worden, mit dem Untersuchungen bei jeder beliebigen Temperatur im Bereich von 600 °C bis 1000 °C möglich sind (Bild 11). Die erreichbaren

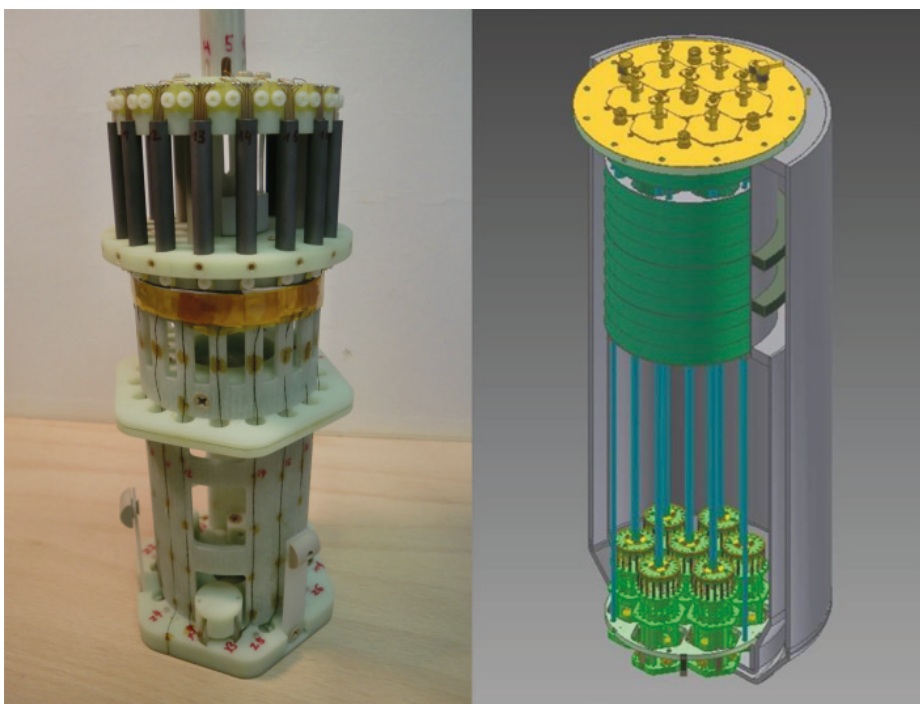


Bild 9: Prototypmodul des neuen Mehrkanal-SQUID-Magnetometer-Systems mit 18 Kanälen. Rechts: Konstruktionszeichnung des Messsystems

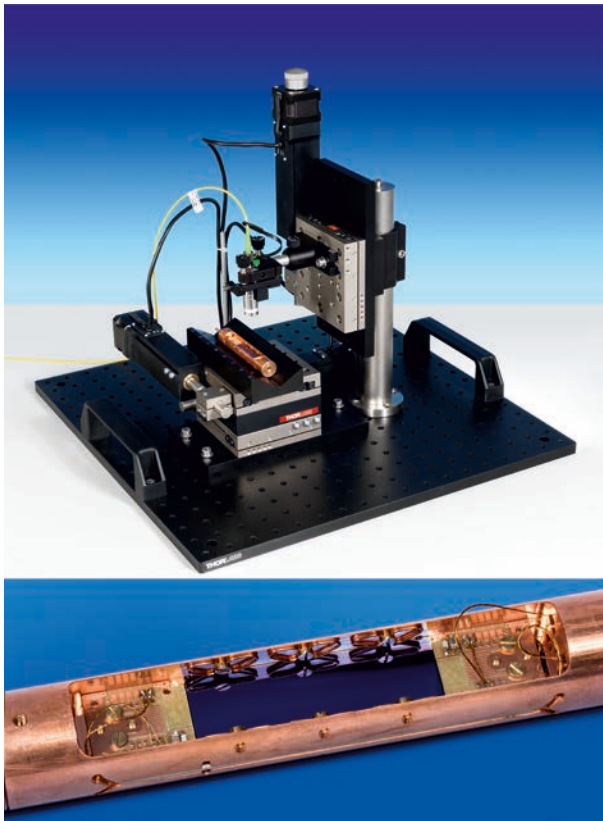


Bild 10: Primäres Magnetfeldfluktuationsthermometer mit SQUID-Sensoren (unten) im Messaufbau zur Bestimmung der Abstände der integrierten Detektions- und Kalibrierspulen (oben)



Bild 11: Temperaturhomogener Wärmerohröfen mit in der oberen Bildhälfte erkennbarer Druckreglung

Unsicherheiten sind nahezu zwei Größenordnungen geringer als mit herkömmlichen Mehrzonenöfen.

Die Anwendung von Infrarot-Kameras zur berührungslosen Temperaturmessung in Industrie und Forschung nimmt stark zu. Das zunehmende Interesse der Anwender an kleinen Messunsicherheiten erfordert eine sehr gute Korrektur der Ungleichförmigkeit der Empfindlichkeit der Bildpunkte des Messsystems. Ein schnelles und von der Homogenität der verwendeten Strahlungsquelle unabhängiges Verfahren zur Ermittlung dieser Ungleichförmigkeit wurde in der PTB entwickelt und patentiert.

Für die radiometrische Kalibrierung von bildgebenden Temperaturmessgeräten im Spektralbereich von 450 nm bis 1,7  $\mu\text{m}$  ist ein neuer Messplatz auf der Grundlage eines leistungsstabilisierten Weißlichtlasers mit nachfolgendem akustooptischen Modulator und einer Ulbrichtkugel in Betrieb gegangen (Bild 12).

Die Arbeiten in der Abteilung zur Rückführung von Erdfernerkundungsmessungen auf die Internationale Temperaturskala, um zuverlässige Aussagen zu langfristigen Temperatur- und Klimaentwicklungen zu ermöglichen, wurden fortgesetzt und erweitert.

Die Rückführung des flugzeuggetragenen Atmosphären-Spektrometers GLORIA auf die Strahlungstemperatur- und Strahldichteskala wurde gemeinsam mit der Bergischen Universität Wuppertal, dem Forschungszentrum Jülich und dem Karlsruher Institut für Technologie ausgebaut. Die „In-flight“-Referenzstrahler des Horizontsondierers GLORIA wurden dazu gezielt weiterentwickelt und charakterisiert. GLORIA ermöglicht über die Messung von quantitativen Infrarotspektren die zwei- und dreidimensional orts aufgelöste Bestimmung von klimarelevanten Spurengasen in der Atmosphäre. Darüber hinaus lieferte die erstmalige Bestimmung der Unsicherheitsfortpflanzung durch die hochgradig nichtlinearen Retrieval-Algorithmen für die Horizontsondierung mit einem Monte-Carlo-Ansatz das fehlende Glied in einem vollständigen End-to-End-Unsicherheitsbudget für diese wichtige Methode der Atmosphärenbeobachtung.

Das *Network for the Detection of Mesospheric Change* (NDMC) ist ein globales Messnetz zur Beobachtung des atmosphärischen Leuchtens in der Mesopause, um die langfristige Entwicklung der Temperatur und weiterer wichtiger Klimaparameter in dieser Region frühzeitig zu erkennen. Kollegen vom Earth Observation Center des DLR haben in enger



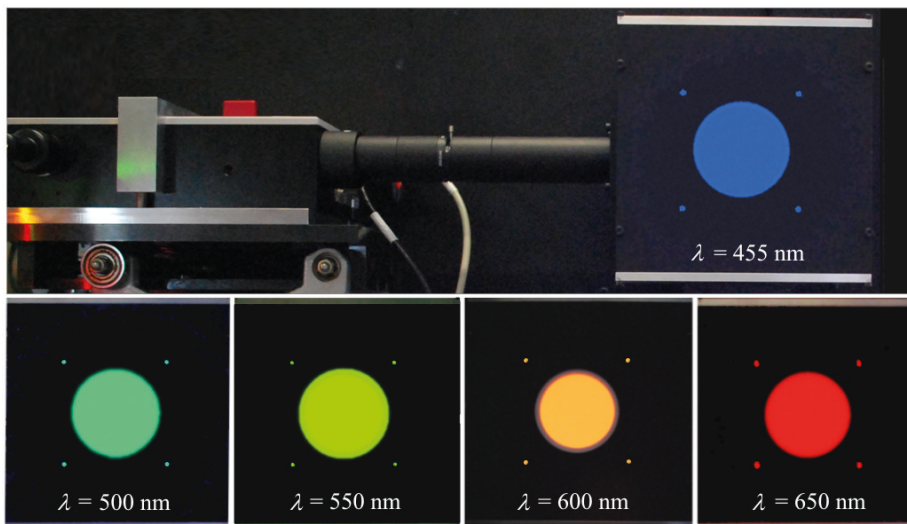


Bild 12: Oben: die blau leuchtende Öffnung einer Ulbrichtkugel, die von einem Weißlichtlaser mit nachgeschaltetem akustooptischen Modulator bestrahlt wird.

Unten: die strahlende Öffnung der Ulbrichtkugel bei verschiedenen Wellenlängen des Lasers

Zusammenarbeit mit der PTB mithilfe von Monte-Carlo-Simulationen die Kalibrieranforderungen an die Spektrometer der bodengestützten Messstationen bestimmt, um zuverlässig Temperaturtrends von 1 Kelvin/Dekade erkennen zu können. Auf dieser Grundlage wird nun durch die PTB und das DLR ein Kalibrierkonzept realisiert, das die Strahlendichte des atmosphärischen Leuchtens mit einer Unsicherheit von 0,5 % bei einer Wellenlänge von 1,5  $\mu\text{m}$  messen kann.

Der kundenorientierte Ausbau zur Bestimmung von thermophysikalischen und infrarot-optischen Materialeigenschaften wurde weiterverfolgt.

Der Emissionsgrad von Oberflächen ist eine sehr wichtige Materialeigenschaft bei der praktischen Anwendung der berührungslosen Temperaturmessung, und seine Unsicherheit dominiert häufig die Messgenauigkeit der Strahlungsthermometrie in

der industriellen Anwendung. Durch einen neu entwickelten Hochtemperaturprobenhalter wurde der Temperaturbereich des Messplatzes zur stationären Emissionsgradmessung von 500 °C auf 1000 °C ausgedehnt (siehe Titelbild des Berichts der Abt. 7).

### Radiometrie

In der PTB wurde ein neuer Messplatz aufgebaut, der erstmals in Europa die genaue Bestimmung der Beugungseffizienz von spektroskopischen IR-Gittern bis zu Wellenlängen von 6  $\mu\text{m}$  ermöglicht (Bild 13). Für den hochauflösenden IR-Echellespektrographen CRIRES+, als wichtiger Teil der Instrumentierung des *Very Large Telescope* der Europäischen Südsternwarte (ESO), wurden damit die Beugungseffizienzen der vorgesehenen Gitter im Spektralbereich von 1  $\mu\text{m}$  bis 6  $\mu\text{m}$  mit einer relativen Standardmessunsicherheit von 1,0 % bis 3,5 % bestimmt. Die Arbeiten erfolgten in enger Kooperation mit der Landessternwarte Thüringen.

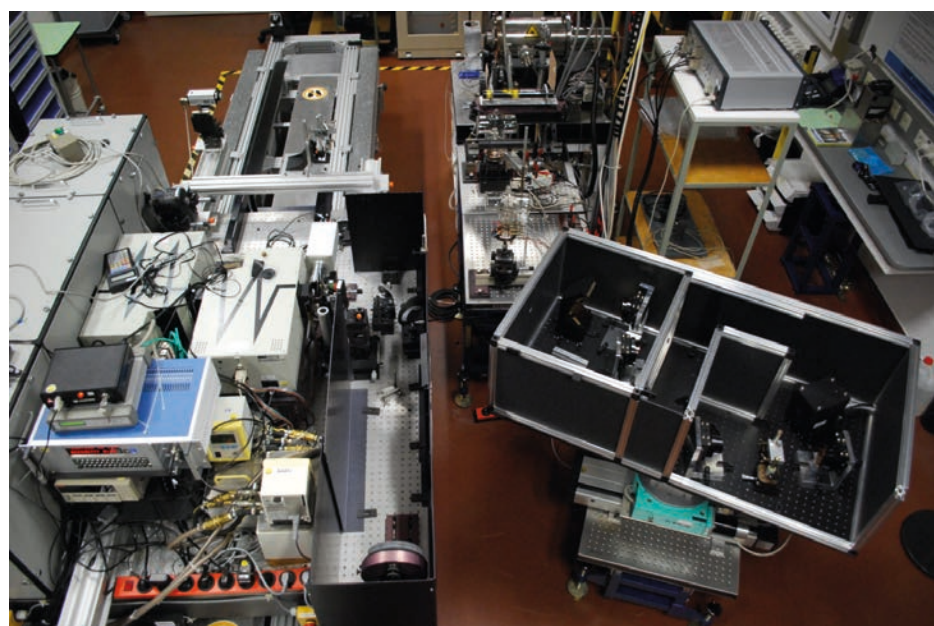


Bild 13: Messplatz zur Bestimmung der Beugungseffizienz von Infrarot-Gittern



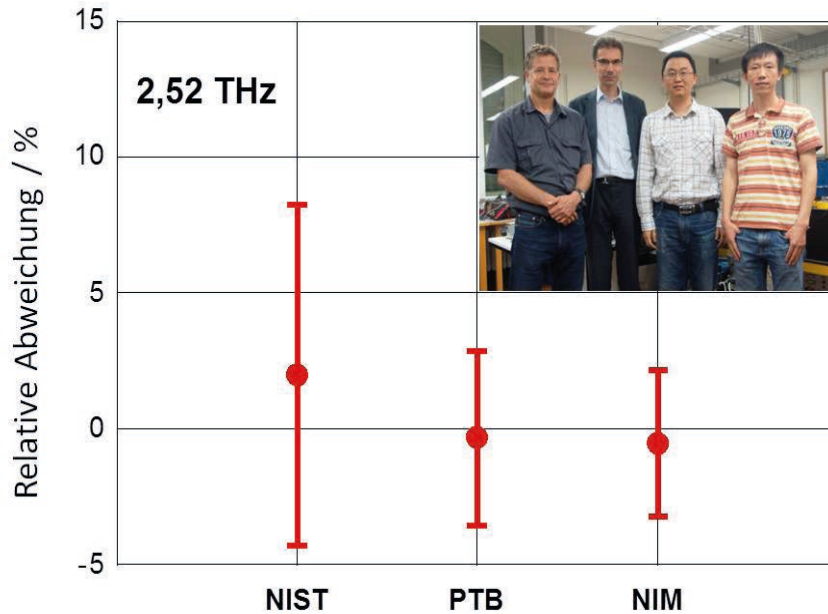


Bild 14: Ergebnis des THz-Pilotvergleichs bei 2,52 THz mit den beteiligten Wissenschaftlern aus USA, Deutschland und China im THz-Labor der PTB

Aufgrund der sich abzeichnenden zunehmenden Bedeutung der THz-Strahlung für die Prozessüberwachung und Sicherheitstechnik wurde in der PTB ein erster internationaler Vergleich zur optischen Leistungsmessung im THz-Spektralgebiet durchgeführt. Dazu wurden unter Teilnahme des amerikanischen (NIST) und des chinesischen Metrologieinstituts (NIM) die spektralen Empfindlichkeiten der drei nationalen THz-Radiometer bei zwei Frequenzen eines THz-Lasers (2,52 THz und 0,762 THz) direkt miteinander verglichen (Bild 14). Die Messergebnisse stimmen sehr gut innerhalb der angegebenen Unsicherheiten überein. Dies erlaubt der PTB, ihre Kalibrierdienstleistung bis zu 0,7 THz auszuweiten (siehe auch Nachrichten des Jahres).

### Thermische Energie

Es wurden Prüfeinrichtungen und Verfahren entwickelt, um die bei Solarapplikationen im Temperaturbereich zwischen  $-20\text{ °C}$  bis  $110\text{ °C}$  als Wärmeträgermedium eingesetzten Wasser-Glykol-Gemische Tyfocor LS (Propylenglykol) und Antifrogen N (Ethylenglykol) sowie die dem Markt angebotenen Wärme- und Kältezähler auf ihre Praxistauglichkeit, d. h. Messrichtigkeit und Beständigkeit, zu untersuchen (Bild 15).

Die an der PTB unter Mitwirkung des Verbands der Deutschen Wasser- und Wärmezählerindustrie e. V. und der Arbeitsgemeinschaft Heiz- und Wasserkostenverteilung e. V. durchgeführten Untersuchungen sind orientierend für die in Solarkreisläufen einzurichtenden Messtechnologien und für die Messge-

räteentwicklung. Thermische Energiemessungen in solaren Primärkreisläufen sind durch international harmonisierte Normen zu standardisieren, um zugleich den Verbraucher- und Umweltschutz bei diesen wichtigen Vorhaben für die Energiewende abzusichern. Der am Forschungsprogramm beteiligten deutschen Industrie ist bereits jetzt ein wissensbasierender Vorteil im globalen Wettbewerb entstanden.



Bild 15: Volumetrischer Prüfstand für messtechnische Untersuchungen an Wärme- und Kältezählern für Solarapplikationen

### Vakuummetrologie

Die Reinheit von Vakuumprozessen spielt in der Industrie eine zunehmend wichtige Rolle. Zur Qualitätssicherung müssen viele im Vakuum eingesetzte Bauteile vor ihrem Einbau auf ihre Ausgasraten geprüft werden. Die Qualität von Ausgasratenmessungen von Vakuumbauteilen leidet einerseits unter einer selten erfolgenden Rückführung der einzelnen Eingangsgrößen, andererseits unter einer unzureichend definierten Messvorschrift. Um diesen Zustand zu verbessern, koordiniert die PTB das EMPIR-Projekt 14SIP01 *Vacuum ISO*, bei welchem auf ISO-Ebene Messvorschriften für vergleichbare und rückgeführte Ausgasratenmessungen entwickelt werden. Gleichzeitig wurde mit dem Institute for Metals and Technology (IMT) in Slowenien eine Referenzausgasungsquelle entwickelt, welche ermöglicht, verschiedene Ausgasratenmesssysteme zu vergleichen und zu validieren. Diese Quelle simuliert ein Vakuumbauteil mit bekannter Ausgasrate. Sie kann für reine Gase oder für Gasmischungen von Wasserstoff, Stickstoff und Kohlendioxid konstruiert werden, auch für Wasserdampf, welcher besondere industrielle Bedeutung besitzt, da oft Systeme nicht ausgeheizt werden (Bild 16). Jüngst wurde erfolgreich ein Vergleich von vier verschiedenen Ausgasratenmessplätzen durchgeführt. Das in der PTB entwickelte System zur Ausgasratenmessung wird zurzeit ergänzt, um auch die zeitabhängige Ausgasung der Oberfläche von Silizium-Kugeln im Rahmen des Avogadro-Projekts untersuchen zu können.

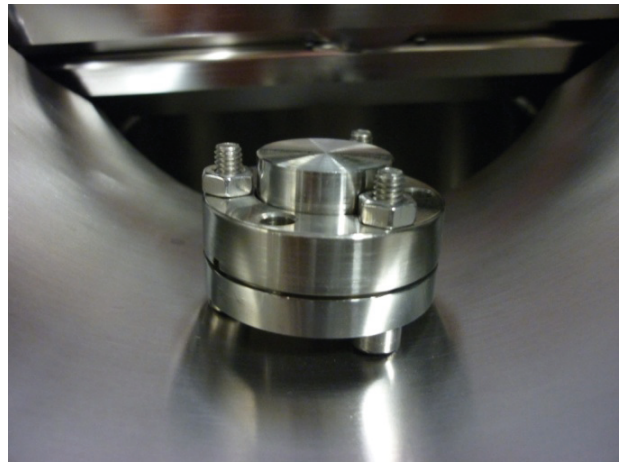


Bild 16: Zum Patent angemeldete, kompakte Referenzausgasungsquelle für Wasserdampf

## In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

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

### Grundlagen der Metrologie

#### Neues Referenzmaterial für die Charakterisierung von Röntgen-Spektrometern

In Zusammenarbeit mit der BAM wurden neue Referenz- und Testmaterialien charakterisiert, die zur Bestimmung der Nachweiswahrscheinlichkeit von energiedispersiven Röntgen-Spektrometern an Elektronenmikroskopen eingesetzt werden können. Die Materialien beinhalten jeweils mehrere chemische Elemente, für die die relativen Intensitäten der Röntgen-Fluoreszenzlinien mit einem Spektrometer ermittelt wurden. Dessen Nachweiswahrscheinlichkeit war zuvor von der PTB am Speicherring BESSY II mit kleinen Unsicherheiten gemessen worden. (M. Krumrey, FB 7.1, [michael.krumrey@ptb.de](mailto:michael.krumrey@ptb.de))

#### ISO-Standard zur Größenbestimmung von Nanopartikeln mit Röntgenkleinwinkelstreuung

Nach langer Vorbereitung ist der ISO-Standard 17867 erschienen, der sich mit der Bestimmung des mittleren Durchmessers von Nanopartikeln mit Hilfe von Röntgenkleinwinkelstreuung befasst. Neben der schon in einem früheren Standard beschriebenen Guinier-Methode ist nun auch die Methode des sogenannten Model-Fittings aufgenommen, mit der schon seit einigen Jahren in der PTB kleine Unsicherheiten bei der Größenbestimmung von hinreichend monodispersen Nanopartikeln realisiert werden. (M. Krumrey, FB 7.1, [michael.krumrey@ptb.de](mailto:michael.krumrey@ptb.de))

#### Verbessertes Verständnis der diffusen Streuung an strukturierten Oberflächen

Durch das Vordringen der Halbleiterfertigung zu Strukturbreiten im Bereich um 10 nm gewinnt auch die Untersuchung entsprechend strukturierter Oberflächen sehr stark an industrieller Bedeutung. Bisherige Verfahren der optischen Lichtstreuung gelangen in diesem Bereich jedoch an die Grenzen der Anwendbarkeit. In diesem Zusammenhang hat die PTB nun Methoden der diffusen Streuung an solchen Strukturen mit EUV- und weicher Röntgenstrahlung entwickelt, mit denen zukünftig zum Beispiel Rauheitsparameter bestimmt werden können. (F. Scholze, FB 7.1, [frank.scholze@ptb.de](mailto:frank.scholze@ptb.de))

#### Rekonstruktion von Molekülorbitalen in drei Dimensionen

In einer Zusammenarbeit mit dem Forschungszentrum Jülich und der Universität Graz wurde am Undulatorstrahlrohr der Metrology Light Source (MLS) im Spektralbereich des Vakuum-UV die winkelaufgelöste Photoelektronenemission ausgerichteter Molekülen auf einem metallischen Substrat untersucht. Mithilfe eines mathematischen Verfahrens ließ sich aus den Spektren die dreidimensionale Verteilung der Molekülorbitale rekonstruieren („Orbitaltomografie“). Die gewonnenen Erkenntnisse sind von hoher Relevanz zum Beispiel bei der Entwicklung organischer Photovoltaik-Elemente (OPV). (A. Gottwald, FB 7.1, [alexander.gottwald@ptb.de](mailto:alexander.gottwald@ptb.de))

#### Neue Nano-SQUIDs erfolgreich getestet

In Zusammenarbeit von Gruppen der PTB Berlin und der PTB Braunschweig ist es innerhalb des in diesem Jahr abgeschlossenen EMRP-Projektes „MetNEMS“ und eines DFG-Vorhabens gelungen, eine Reihe von komplexen Nano-SQUIDs auf der Basis von Nb/HfTi/Nb-Josephson-Kontakten zu entwickeln. Die Bauelemente sind in Magnetfeldern von einigen 10 mT oder sogar bis zu einigen 100 mT – abhängig vom Design – betreibbar und weisen dabei eine sehr geringe Nichtlinearität auf. Dies vergrößert das Anwendungspotenzial der SQUIDs erheblich. Wichtige Anwendungen ergeben sich z. B. bei der Charakterisierung magnetischer Nanopartikel oder im Auslesen von Nanoelektromechanischen Systemen (NEMS). (S. Bechstein, FB 7.2, [sylke.bechstein@ptb.de](mailto:sylke.bechstein@ptb.de))

#### Erfolgreiche Erprobung des „Ultrastable Low-noise Current Amplifier“

Der in Zusammenarbeit mit Abteilung 2 entwickelte „Ultrastable Low-noise Current Amplifier“ (ULCA) wurde im Berichtszeitraum erstmals außerhalb der PTB erprobt. In einem internationalen Vergleich mit den britischen und französischen Metrologieinstituten wurde eine Übereinstimmung von besser  $10^{-6}$  erzielt und damit ein neuer Genauigkeitsrekord bei der Erzeugung und Messung kleiner Gleichströme im Bereich um 1 nA aufgestellt. Erste Messungen in einem privaten Kalibrierlabor (esz AG) verliefen ebenfalls sehr erfolgreich. Innerhalb der PTB konnte erstmals mithilfe des ULCA eine Quantenstromquelle mit 0,2 ppm Unsicherheit validiert und damit

der bisherige Bestwert um den Faktor 5 verbessert werden. (D. Drung, FB 7.2, dietmar.drung@ptb.de)

### **Messsystem für die Charakterisierung von Quantenpunkt-Photonenquellen**

Durch die Arbeitsgruppe 7.21 *Kryosensoren* wurde ein Messsystem für die Charakterisierung von Quellen einzelner bzw. weniger Photonen aufgebaut. Diese Aktivität ist Teil einer Kooperation mit der Technischen Universität Berlin (TUB) als Entwickler von Halbleiter-Quantenpunkt-Photonenquellen und erfolgt im Rahmen des EMPIR-Vorhabens „Optical Metrology for Quantum-enhanced secure telecommunication – MIQC2“ sowie eines DFG-Vorhabens zur Entwicklung von Einzel-Quantenpunkt-Lasern. Das Messsystem verwendet supraleitende, kalorimetrische TES-Detektoren, die vom NIST zur Verfügung gestellt wurden, sowie SQUID-Stromsensoren der PTB zu deren Auslesung. Das mobile System wurde an der TUB gemeinsam mit der PTB in Betrieb genommen und wird für Messungen der Photonen-Verteilungsfunktion der QD-Quellen eingesetzt. (J. Beyer, FB 7.2, joern.beyer@ptb.de)

### **Abschluss von EMRP-Projekten in der Röntgenspektrometrie**

Im Jahr 2015 wurden die beiden EMRP-Projekte „Metrology for the characterisation of biomolecular interfaces for diagnostic devices“ und „Traceable characterisation of nanostructured devices“ zu modernen Anwendungen der Röntgenspektrometrie erfolgreich abgeschlossen. Zum einen wurden Messtechniken erweitert und entwickelt, die es ermöglichen, biomolekulare Grenzflächen, wie sie beispielsweise auf diagnostischen Oberflächen vorkommen, zu untersuchen. Zum anderen wurden inorganische und organische Mikro- und Nanostrukturen aus dem Bereich der elektronischen Halbleiter in Bezug auf ihre chemischen und physikalischen Eigenschaften durch rückführbare referenzprobenfreie Röntgenspektrometrie u. a. tiefenaufgelöst untersucht. (B. Beckhoff, FB 7.2, burkhard.beckhoff@ptb.de)

### **Bestimmung der Molekülbelegungsdichte funktionalisierter Oberflächen**

Zur Einstellung bestimmter Oberflächeneigenschaften können verschiedene Materialien durch eine Monolage von organischen Molekülen funktionalisiert werden. Beispielsweise werden Organosilane eingesetzt, um die Oberflächeneigenschaften von Gläsern, Polymeren u. a. Materialien zu modifizieren. Eine wichtige Fragestellung dabei ist, die Molekülbelegungsdichte absolut zu bestimmen, um

beispielsweise Herstellungsprozesse zu qualifizieren oder die Reaktivität der Oberfläche zu beurteilen. Durch die Bestimmung der absoluten Massenbelegung von Stickstoffatomen auf einer Glasoberfläche ist es erstmals gelungen, die Oberflächenbelegung dieser Silanmoleküle mittels Röntgenspektrometrie unter streifendem Einfall zu bestimmen. In der Zusammenarbeit mit der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) wurden die Probensysteme ebenfalls mit Photoelektronenspektroskopie untersucht, wobei die Ergebnisse der PTB zur Kalibrierung eines Photoelektronenspektrometers eingesetzt werden konnten. (C. Streeck, FB 7.2, cornelia.streeck@ptb.de)

### **CCQM-Ringvergleich zur Messung von Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub>-Dünnschichten**

Im CCQM Key Comparison K-129 wurde die Bestimmung von Stoffmengenanteilen von Cu, In, Ga und Se in Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub>-Dünnschichten angestrebt. Diese Schichten werden u. a. als Absorberschichten von Dünnschicht-Solarzellen eingesetzt und haben die Eigenschaft, dass sie bei der Prozessierung häufig auch in nicht-stöchiometrischer Form abgeschieden werden. Die dabei erreichte Zusammensetzung hat einen entscheidenden Einfluss auf die Effizienz der hergestellten Solarzellen. Die PTB hat sich in dieser vom südkoreanischen Metrologieinstitut KRISS initiierten Vergleichsstudie mit dem Verfahren der referenzprobenfreien Röntgenfluoreszenzanalyse beteiligt. (C. Streeck, FB 7.2, cornelia.streeck@ptb.de)

### **Patentanmeldung einer In-Situ-Messzelle**

Im Rahmen des EMRP-Projektes „Metrology for the characterisation of biomolecular interfaces for diagnostic devices“ wurde eine In-Situ-Messzelle entwickelt, die es erlaubt, Flüssigkeiten und Fest-Flüssig-Grenzflächen mittels Röntgenanalytik in einer Vakuumkammer zu untersuchen. Die in Zusammenarbeit mit der Technischen Universität Berlin entstandene Erfindung wurde beim Europäischen Patentamt angemeldet. Die erfolgreiche Zusammenarbeit wurde im Rahmen des EMRP-Projektes „Metrology for VOC indicators in air pollution and climate change“ fortgesetzt. Dabei wurde das Design der Messzelle insoweit angepasst, dass Röntgenfluoreszenzmessungen an adsorbierten Gasen an Oberflächen von Halbleitern ermöglicht werden (A. Nutsch, FB 7.2, andreas.nutsch@ptb.de).



### Untersuchung von 2D-Materialien der neuen Generation mit Nahfeldmethoden

Im Rahmen der Kooperation mit der Freien Universität Berlin wurden an der MLS mit dem Infrarot-Streulichtnahfeldmikroskop neue nanoelektronische Materialien im Hinblick auf deren Anwendung in plasmonischen Schaltkreisen untersucht. Erstmals konnte die Kopplung zwischen  $\text{SiO}_2$ -Phononmoden und Plasmonmoden von nanostrukturierten  $\text{MoS}_2$ -Mono- und Bilagen nachgewiesen werden. Die Ergebnisse belegen die Möglichkeit, mit dieser Messmethode lokal plasmonische Anregungen zu untersuchen. (P. Hermann, FB 7.2, peter.hermann@ptb.de)

### IR-Mikrospektroskopie mit Synchrotronstrahlung

Am IR-Strahlrohr „IRMA“ der MLS konnte die oberflächenverstärkte Infrarot-Spektroskopie (SEIRA) erfolgreich zur Charakterisierung diverser nanopartikulärer Biolabels eingesetzt werden. SEIRA ermöglicht eine gegenüber der konventionellen IR-Spektroskopie sensitivere (Faktor~10–50) schwingungsspektroskopische Analyse molekularer Spezies. Zwar ist der Verstärkungsfaktor (EF) von SEIRA (EF~101–104) deutlich geringer als beim komplementären SERS (EF~106–1010), jedoch kann aufgrund des effektiven Wirkungsquerschnitts, der für IR-Absorption ca. neun Größenordnungen höher liegt, eine moderate Verstärkung erzielt werden. In einer Publikation konnte gezeigt werden, dass SEIRA als schnelles und robustes Verfahren zur Qualifizierung von Biolabels für Bioassay-Applikationen eingesetzt werden kann. Hierbei wurden u. a. die SEIRA-Fingerprintspektren der Biolabels basierend auf nanopartikulären Gold-Substraten, an welche diverse Antikörper-Fluorophor-Konjugatssysteme gekoppelt wurden, mithilfe multivariater Verfahren hinsichtlich ihrer Multiplexizität analysiert. (A. Hornemann, FB 7.2, andrea.hornemann@ptb.de)

### Absolute Beugungseffizienz von Infrarot-Gittern für die Astronomie bestimmt

Für die Modernisierung des hochauflösenden Infrarot-Echellespektrografen CRIRES, als wichtiger Teil der Instrumentierung des Very Large Telescope der Europäischen Südsternwarte (ESO), wurden die Beugungseffizienzen der als dispersive Elemente für das Nachfolgeinstrument CRIRES+ vorgesehenen Gitter im Spektralbereich von 1  $\mu\text{m}$  bis 6  $\mu\text{m}$  erstmalig mit einer relativen Standardmessunsicherheit von 1 % bis 3,5 % bestimmt. Die dafür notwendige Messapparatur wurde in der PTB im Rahmen einer Kooperation mit der Landessternwarte Thüringen

entwickelt und eingesetzt. (R. D. Taubert, FB 7.3, dieter.taubert@ptb.de)

### Quotienten-Filterradiometer für die thermodynamische Temperaturmessung

Oberhalb von 1000 °C ist die zuverlässige Bestimmung thermodynamischer Temperaturen nur mit radiometrischen Methoden möglich. Hierbei erfolgte bisher die Rückführung einzig auf das Kryoradiometer als primäres Empfängernormal. Unabhängig von dieser Methode besteht nun mit einem neu entwickelten Quotienten-Filterradiometer die Möglichkeit, die thermodynamische Temperatur von Hochtemperatur-Fixpunkten rückgeführt auf die beiden primären Strahlernormale Elektronenspeicherring und Schwarzer Körper zu bestimmen. (M. Wähler, FB 7.3, martin.waehmer@ptb.de)

### Messplatz für Schallgeschwindigkeiten von Flüssigkeiten

Im Rahmen eines Promotionsvorhabens wurde ein Messplatz für Schallgeschwindigkeitsuntersuchungen aufgebaut. Hiermit können für ozeanografische Fragestellungen und für Untersuchungen von Wärmeträgern für Kraftwerke Messungen im Temperaturbereich von 10 °C bis 100 °C bei Drücken bis zu 100 MPa durchgeführt werden. Im Besonderen ist es möglich, elektrisch leitfähige und korrosive Flüssigkeiten zu untersuchen. Darüber hinaus bietet der Messplatz den Vorteil, dass gleichzeitig zwei Schallgeschwindigkeitssensoren im Vergleichsverfahren kalibriert werden können. (F. Fehres, FB 7.4, felix.fehres@ptb.de)

### Verbesserte Präzisionsbestimmung der Boltzmann-Konstanten in der PTB

Ausführliche Vergleiche zwischen Kolbenmanometern unterschiedlicher effektiver Querschnittsfläche haben kombiniert mit den entsprechenden genauen dimensionellen Daten zu einer weltweit einzigartig niedrigen relativen Unsicherheit von einem Millionstel (1,0 ppm) bei der Druckmessung bis 7 MPa geführt. Damit konnte nun mit dem Dielektrizitätskonstanten-Gasthermometer der PTB ein Wert für die Boltzmann-Konstante  $k$  von  $1,3806509 \cdot 10^{-23}$  J/K mit einer Unsicherheit von 4 Millionstel (4,0 ppm) bestimmt werden. Im nächsten Jahr soll der endgültige Schritt hin zu einer angestrebten Unsicherheit von 2 ppm erfolgen und damit der Weg für die Neudefinition der Basiseinheit Kelvin über die Festlegung von  $k$  geebnet werden. (C. Gaiser, FB 7.4, christof.gaiser@ptb.de)

### **Bestimmung der effektiven Kompressibilität von Messkondensatoren zwischen 2 K und 300 K**

Für Messungen mit dem Dielektrizitätskonstanten-Gasthermometer ist die Kenntnis der effektiven Kompressibilität  $k_{\text{eff}}$  des Messkondensators erforderlich. Die Anwendung der Tieftemperaturapparatur war durch die bisherige relative Unsicherheit von 2 % für diese Einflussgröße auf Temperaturen unter 80 K beschränkt. Mit einer neuen Methode, welche die Beziehungen thermophysikalischer Eigenschaften von Festkörpern ausnutzt, war eine unabhängige Bestimmung von  $k_{\text{eff}}$  im Temperaturbereich zwischen 2 K und 300 K möglich. Das erlaubt nun die thermodynamische Temperatur in diesem Bereich mit deutlich verringerten Unsicherheiten von etwa einem tausendstel Kelvin zu messen. Damit kann ein wesentlicher Beitrag zur Verbesserung der Darstellung und Weitergabe der Temperatureinheit geleistet werden. (C. Gaiser, FB 7.4, christof.gaiser@ptb.de)

### **Roadmap für die Rauschthermometrie an der PTB**

Um auch im Bereich oberhalb des Wassertripelpunktes thermodynamische Temperaturen zur Darstellung der Temperatureinheit mit ausreichend kleiner Unsicherheit messen zu können, benötigt die PTB neben der Dielektrizitätskonstanten-Gasthermometrie eine zweite leistungsstarke Methode der Primärthermometrie. Als Alternative zum akustischen Gasthermometer wurde die Rauschthermometrie ausgewählt, die auf der Messung des statistischen Spannungsrauschens eines Widerstandes beruht und ein hohes Leistungspotenzial für die Zukunft insbesondere bei hohen Temperaturen besitzt. Eine Studie zu diesem Thema verknüpft Arbeitspakete verschiedener Fachbereiche in den Abteilungen *Temperatur und Synchrotronstrahlung* und *Elektrizität* und enthält einen Zeit- und Finanzplan. Die Arbeiten werden im Jahr 2016 beginnen. (C. Gaiser, FB 7.4, christof.gaiser@ptb.de)

### **Abschluss des EMRP-Projekts „Implementing the new kelvin – InK“**

Das Projekt wurde im Mai 2015 mit einem Royal Society Workshop zum Thema „Towards implementing the new kelvin“ erfolgreich abgeschlossen. Die PTB konnte mit vier eingeladenen Vorträgen ein Viertel des Workshop-Programms bestreiten. Ziel des Projektes war die Entwicklung und Verbesserung primärthermometrischer Methoden zur Messung thermodynamischer Temperaturen im Bereich von über 1300 K bis unter 1 K sowie die Bestimmung neuer Werte für die Abweichungen der aktuellen Temperaturskalen ITS-90 und PLTS-2000 von der thermo-

dynamischen Temperatur. Die Ergebnisse werden die Basis bilden für die Umsetzung der zukünftigen „Mise en Pratique“ für das Kelvin nach der erwarteten Neudefinition der Temperatureinheit im Jahr 2018. (J. Engert, FB 7.4, jost.engert@ptb.de)

### **Pilotstudie für einen Vergleich von Drücken im Ultrahochvakuum**

Die PTB ist bisher das weltweit einzige Metrologieinstitut mit CMC-Einträgen unter  $10^{-7}$  Pa. Das NMIJ (Japan) hat nun jüngst ein eigenes nationales Normal entwickelt, das den Druckbereich bis herunter zu  $10^{-9}$  Pa abdeckt. In der CCM-Arbeitsgruppe für Druck und Vakuum wurde daher beschlossen, beim 2016 anstehenden Schlüsselvergleich diesen Druckbereich mit einzuschließen, wenn eine entsprechende Pilotstudie erfolgreich ist. Diese wurde bis 2014 vom NMIJ und der PTB durchgeführt und zeigte, dass sowohl geeignet stabile Transfornormale zur Verfügung stehen als auch eine Übereinstimmung der beiden nationalen Normale vorhanden ist. (K. Jousten, FB 7.5, karl.jousten@ptb.de)

### **Neues nationales Normal für Partialdrücke im Vakuum validiert**

Im Rahmen des EMRP-IND12-Projekts hat die Arbeitsgruppe Vakuummetrologie ein Normal für Partialdrücke aufgebaut. Dieses wurde nun erfolgreich validiert. Mit diesem Normal ist es möglich, gleichzeitig Partialdrücke von drei verschiedenen Gasen in Mischungsverhältnissen von 1:1 bis 1:10<sup>6</sup> im Hoch- und Ultrahochvakuum aufzubauen und zur Kalibrierung von Quadrupolmassenspektrometern zu nutzen. Das gleichzeitige Vorhandensein verschiedener Gase ist bei der Kalibrierung dieser Partialdruckgeräte wichtig, weil die Empfindlichkeit für eine Gasart vom Vorhandensein anderer Gasarten und vom Totaldruck abhängt. Das neue Normal besitzt auch ein Modul, mit dem Ausgasraten von im Vakuum befindlichen Gegenständen rückgeführt gemessen werden können. (K. Jousten, FB 7.5, karl.jousten@ptb.de)

### **Kombination verschiedener laseroptischer Messmethoden**

Durch die Kombination eines Particle-Image-Velocimeters (PIV) mit einem Laser-Doppler-Velozimeter (LDV) wurde eine Methode zur nicht-invasiven On-Site-Kalibrierung des PIV-Systems in Rohrleitungen entwickelt und patentiert. Kernstück der Patentidee ist es, den örtlich präzise bekannten Schnittpunkt der Laserstrahlen des LDV-Systems anstelle eines bisher verwendeten Targets zur Bestimmung der Abbildungsfunktion von den Koordinaten im Rohr auf die Pixel-Koordinaten des PIV-

Systems zu verwenden. (C. Koglin, FB 7.5, christian.koglin@ptb.de)

### **Metrologie für die Wirtschaft**

#### **Bestimmung optischer Eigenschaften für EUV-Materialien**

Die Weiterentwicklung der EUV-Projektionslithografie in der Halbleiterindustrie erfordert den Übergang zu Objektiven mit höherer numerischer Apertur. In einer Zusammenarbeit mit Globalfoundries und IMEC wurden dafür neuartige Absorberschichten auf EUV-Photomasken untersucht, um eine Verbesserung des Kontrasts in der lithografischen Abbildung zu erreichen. (F. Scholze, FB 7.1, frank.scholze@ptb.de)

#### **PTB-Beteiligung am EU-Projekt SeNaTe zur Entwicklung der Halbleiterindustrie**

Die PTB ist einer von 41 Partnern in dem dreijährigen Projekt „Seven Nanometre Technology“ (SeNaTe) unter dem EU-Programm Horizont 2020 im ECSEL-Call 2014-2 „Innovation Actions“ zur Entwicklung der technologischen Infrastruktur für die Fertigung von Halbleiterbauelementen mit 7-nm-Technologie. Im Projekt trägt die PTB mit ihrer über viele Jahre entwickelten Expertise in der EUV-Radiometrie durch die Charakterisierung von optischen Komponenten und Detektoren und durch Beratung zum Aufbau der messtechnischen Infrastruktur bei. (F. Scholze, FB 7.1, frank.scholze@ptb.de)

#### **Charakterisierung von EUV-Reflektoren mit hoher IR-Unterdrückung**

In einem MNPQ-Projekt mit der Start-up-Firma optiXfab unterstützt die PTB messtechnisch die Markteinführung von hochkomplexen Kollektoren für EUV-Plasmaquellen in Lithografiemaschinen. Durch integrierte Strukturen sollen diese Optiken bei hoher EUV-Reflektivität IR-Reflexionen unterdrücken. Bereits im ersten Jahr der Projektlaufzeit konnten entsprechende Messergebnisse erzielt werden. (F. Scholze, FB 7.1, frank.scholze@ptb.de)

#### **Out-of-Band-Reflektivität von EUV-Optiken**

Spiegel als optische Elemente für die EUV-Lithografie verfügen über eine Mo/Si-Multilayer-Beschichtung zur Erhöhung des Reflexionsgrades in einem schmalen Wellenlängenband um 13,5 nm. Die Schichten reflektieren auch sehr gut bei längeren Wellenlängen im UV und Vakuum-UV, jedoch ohne scharfe Abbildung durch die Projektionsobjektive. Bei der Belichtung des Photolacks auf einem Halbleiterwafer verringert dies den Kontrast. Zur Entwicklung von EUV-Optiken mit unterdrückter

Out-of-Band-Reflexion wurden daher in Kooperation mit Industrieunternehmen an dem UV- und VUV-Strahlrohr der Metrology Light Source im Spektralbereich zwischen 100 nm und 400 nm umfangreiche Messungen durchgeführt. (A. Gottwald, FB 7.1, alexander.gottwald@ptb.de)

#### **Ausweitung der Bestimmung von atomaren Daten für die Röntgenanalytik**

Im Juni 2015 wurde die Förderung des internationalen Vorhabens zur Bestimmung atomarer Fundamentalparameter durch mehrere röntgenanalytische Gerätehersteller um zwei Jahre verlängert. Diese Ausweitung der ursprünglichen Zusammenarbeit von Partnern aus Frankreich, der Schweiz, Japan und Deutschland hat zum Ziel, die erfolgreich entwickelten und erprobten Messverfahren auf einen größeren Bereich der Elemente im Periodensystem anzuwenden. Die in diesem Projekt mit geringen Unsicherheiten bestimmten atomaren Fundamentalparameter erhöhen die Zuverlässigkeit der quantitativen Röntgenfluoreszenzanalyse. (M. Müller, FB 7.2, matthias.mueller@ptb.de)

#### **Patent zur Korrektur der Ungleichförmigkeit von Bildaufnahmesystemen**

Die Anwendung von Infrarot-Kameras in Industrie und Forschung nimmt stark zu. Dabei zeigt sich ein zunehmendes Interesse der Anwender an kleinen Messunsicherheiten bei der bildhaften Aufnahme von Messwerten. Dies ist nur bei einer sehr guten Korrektur der Ungleichförmigkeit der Empfindlichkeit der Bildpunkte des Messsystems möglich. Ein schnelles und von der Homogenität der verwendeten Strahlungsquelle unabhängiges Verfahren zur Ermittlung dieser Ungleichförmigkeit, aber auch zur Ermittlung der Ungleichförmigkeit der Intensitätsverteilung von großflächigen Kalibrierstrahlern wurde in der PTB entwickelt und patentiert. Das spektral unabhängige Verfahren beruht auf einem systematischen Aufnehmen von räumlich versetzten Bildern und einem nachfolgenden Auswertalgorithmus, der die Empfindlichkeit der einzelnen Bildpunkte des Systems zueinander ins Verhältnis setzt. (B. Gutschwager, FB 7.3, berndt.gutschwager@ptb.de)

#### **Abschluss des Verbundvorhabens „ThermoElektrik Standardisierung“ (TEST)**

Das innerhalb des BMBF-Rahmenprogramms „Werkstoffinnovationen für Industrie und Gesellschaft – WING“ geförderte Projekt TEST wurde im Juni dieses Jahres erfolgreich abgeschlossen. Ziele des Projektes waren die Entwicklung einer zuverlässigen thermoelektrischen Messtechnik und die

Einführung rückführbarer Methoden zur Messung insbesondere des Seebeck-Koeffizienten. Neben der PTB waren das Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik, das DLR-Institut für Werkstoff-Forschung und die Firma Netzsch-Gerätebau GmbH beteiligt. Ab 2016 stehen neben den bereits seit 2014 durch die PTB charakterisierten Referenzmaterialien ISOTAN und PbTe nun auch SiGe (300 K bis 625 K) und FeSi<sub>2</sub> (300 K bis 800 K) zur Verfügung. (F. Edler, FB 7.4, frank.edler@ptb.de)

### **Kalibrierplatz für Hochtemperatur-Normalthermometer komplettiert**

Nachdem im vergangenen Jahr ein Messplatz für Kalibrierungen von Hochtemperatur-Normalthermometern an den Fixpunkten der Internationalen Temperaturskala von 1990 (ITS-90) in Betrieb genommen wurde, ist dieser um einen druckgeregelten Wärmerohfen ergänzt worden. Hiermit sind Untersuchungen bei jeder beliebigen Temperatur im Bereich von 600 °C bis 1000 °C möglich. Die erreichbaren Unsicherheiten sind nahezu zwei Größenordnungen geringer als mit herkömmlichen Mehrzonenöfen. (S. Krenek, FB 7.4, stephan.krenek@ptb.de)

### **DKD-Ringvergleich von Hochtemperatur-Blockkalibratoren**

Vor-Ort-Kalibrierungen von Berührungsthermometern im industriellen Umfeld werden nahezu ausschließlich mit Temperatur-Blockkalibratoren durchgeführt. Im Bereich hoher Temperaturen zwischen 600 °C und 1200 °C gab es bisher keine belastbaren Untersuchungsergebnisse zu hiermit erreichbaren Messunsicherheiten, was zu erheblichen Ungleichgewichten bei Akkreditierungen innerhalb von Europa geführt hat. Im Rahmen eines DKD-Ringvergleichs mit 7 Teilnehmern und einer ergänzenden Pilotstudie wurden unter Federführung der ZMK GmbH und der PTB umfangreiche Ergebnisse gesammelt, die zukünftig als Grundlage für Akkreditierungen in Europa, Normungsvorhaben und Kalibrierrichtlinien dienen werden. (S. Rudtsch, FB 7.4, steffen.rudtsch@ptb.de)

### **Verstärkte Nachfrage nach Weitergabe der Tieftemperaturskala PLTS-2000 mittels MFFT**

Das von der PTB in Zusammenarbeit mit der Universität Heidelberg und der Firma Magnicon entwickelte Magnetfeld-Fluktuations-Thermometer (MFFT) hat sich als praktisches Tieftemperaturthermometer für den Temperaturbereich von 4 K bis ins Millikelvingebiet bewährt. Die vor zwei Jahren neu eingeführte Kalibrierdienstleistung zur Rückführung dieser Thermometer auf die aktuelle Tieftem-

peraturskala PLTS-2000 trägt nun erste Früchte. Die Zahl der durchgeführten Kalibrierungen von MFFT hat sich innerhalb des letzten Jahres mehr als verdreifacht. Im Moment wird die Befriedigung der Nachfrage durch die Produktionskapazitäten für die MFFT begrenzt. (J. Engert, FB 7.4, jost.engert@ptb.de)

### **Referenzausgasungsquelle für Wasserdampf**

Im Rahmen des EMRP-IND12-Projekts wurde gemeinsam vom Institut za Kovinske Materiale in Tehnologije (IMT) in Slowenien und der PTB eine Referenzausgasungsquelle entwickelt und zum Patent angemeldet. Unter anderem kann sie für Wasserdampf verwendet werden. Dabei strömt ein konstanter, kalibrierbarer Gasfluss von Wasserdampf aus. Dieser wurde in einem Vergleich von Apparaturen zur Ausgasratenmessung bei 4 Projektteilnehmern bestimmt, dem IMT, der PTB, dem Karlsruher Institut für Technologie (KIT) und der Firma VACOM. Vollständige Übereinstimmung der Werte gab es für das IMT, die PTB und VACOM. Das KIT wich vom Referenzwert ab, vermutlich, weil beim KIT keine Partialdruckmessung erfolgt, sondern mit für Stickstoff kalibrierten Ionisationsvakuummetern gemessen wurde, deren relative Empfindlichkeit für Wasser nur geschätzt werden kann. (K. Jousten, FB 7.5, karl.jousten@ptb.de)

### **Metrologie für die Gesellschaft**

#### **Weiterentwicklung der SUMER-Transferquelle**

Durch den Einsatz von Multilayer-Optik konnte der Einsatzbereich einer Transferstrahlungsquelle, die vor 25 Jahren in der PTB zur Kalibrierung des SUMER-Spektrografen der Weltraummission SOHO im Wellenlängenbereich von 200 nm bis 40 nm entwickelt wurde, bis 16 nm erweitert werden. Er umspannt jetzt den kompletten Wellenlängenbereich des für die geplante Sonnenmission SolarC projektierten LEMUR-Spektrografen, dessen Kalibrierung in der PTB vorbereitet wird. (R. Klein, FB 7.1, roman.klein@ptb.de)

#### **Multilayerspiegel für Röntgenmikroskop charakterisiert**

Für Plasmauntersuchungen am französischen Laser Mégajoule wird derzeit ein Röntgenmikroskop entwickelt, das in einem weiten Spektralbereich eingesetzt werden soll. Die dafür erforderlichen Toroidspiegel mit einer W/Si-Multilayer-Beschichtung und einem Schichtdickengradienten, sogenannte Supermirrors, wurden an verschiedenen Strahlrohren bei BESSY II charakterisiert. Es konnte nachgewiesen werden, dass der Reflexionsgrad bei konstantem



Einfallswinkel im Photonenenergiebereich von 7 keV bis 22 keV im Vergleich zu Einschichtspiegeln deutlich höher ist und insbesondere mit der Photonenenergie nur wenig variiert. (M. Krumrey, FB 7.1, michael.krumrey@ptb.de)

### **Größenbestimmung von Nanopartikeln mit Röntgenkleinwinkelstreuung unabhängig von der biologischen Umgebung**

Im Rahmen des EMRP-Projekts NanoChOp wurde untersucht, inwieweit die Größenbestimmung von Nanopartikeln durch ein umgebendes biologisches Medium beeinflusst wird. Während sich bei einigen Methoden wie Dynamischer Lichtstreuung (DLS) und *Particle Tracking Analysis* (PTA) ein deutlicher Effekt zeigt, der teilweise sogar eine Auswertung der Messungen verhindert, kann mit Röntgenkleinwinkelstreuung (*Small-Angle X-ray Scattering*, SAXS) die Größe der primären Partikel auch in biologischen Medien mit kleinen Unsicherheiten bestimmt werden. (M. Krumrey, FB 7.1, michael.krumrey@ptb.de)

### **Workshop Metrology with and for NEMS and Superconducting Sensors**

In Verbindung mit dem Abschlussmeeting für das EMRP-Projekt MetNEMS hat der FB 7.2 an der PTB Berlin am 18. Juni 2015 einen Workshop ausgerichtet, bei dem Teilnehmer aus verschiedenen europäischen Forschergruppen über neue Entwicklungen auf dem Gebiet der Herstellung, Untersuchung und Anwendung von NEMS, Nano-SQUIDS und supraleitenden Photonendetektoren berichteten. U. a. wurden Bauelementestrukturen mit neuen Materialien wie Magnesiumdiborid und Graphen behandelt. (Th. Schurig, FB 7.2 thomas.schurig@ptb.de)

### **Entwicklung verbesserter Lithium-Schwefel-Batterien durch In-situ-Röntgenmesstechnik**

Zusammen mit dem Leibniz-Institut für Polymerforschung Dresden und der Technischen Universität Ilmenau entwickelt die PTB im Rahmen eines neuen DFG-Verbundvorhabens Messtechniken für die spektroskopische Untersuchung neuartiger Batteriematerialien während der Entlade- und Aufladeprozesse der Batteriezelle. Im Fokus der Arbeiten bei der PTB steht die Entwicklung einer Ultrahochvakuum-kompatiblen aktiven Batteriezelle mit dünnem Eintrittsfenster für den Zugang mit Röntgenstrahlung. (M. Müller, FB 7.2, matthias.mueller@ptb.de)

### **Kalibrieranforderungen für den Nachweis von Temperaturtrends in der Mesopause**

Das „Network for the Detection of Mesospheric Change“ ist ein globales Messnetz zur Beobachtung des atmosphärischen Leuchtens in der Mesopause, um die langfristige Entwicklung der Temperatur und weiterer wichtiger Klimaparameter in dieser Region frühzeitig zu erkennen. Im Rahmen des europäischen Forschungsvorhabens MetEOC2 haben Kollegen vom Earth Observation Center des DLR in enger Zusammenarbeit mit der PTB mithilfe von Monte-Carlo-Simulationen die Kalibrieranforderungen an die Messstationen bestimmt, um zuverlässig Temperaturtrends von 1 Kelvin/Dekade erkennen zu können. Auf dieser Grundlage wird nun durch die PTB und das DLR ein Kalibrierkonzept realisiert, das die Strahldichte des atmosphärischen Leuchtens mit einer Unsicherheit von 0,5 % bei einer Wellenlänge von 1,5  $\mu\text{m}$  messen kann. (M. Reiniger, FB 7.3, max.reiniger@ptb.de)

### **Unsicherheitsfortpflanzung durch Retrieval-Algorithmen für die atmosphärische Horizontsondierung**

Die erstmalige Bestimmung der Unsicherheitsfortpflanzung durch Retrieval-Algorithmen für die Horizontsondierung liefert das fehlende Glied in einem End-to-End-Unsicherheitsbudget für diese wichtige Methode der Atmosphärenbeobachtung. Im Rahmen des europäischen Forschungsvorhabens MetEOC2 wurde am Institut für Energie- und Klimaforschung am Forschungszentrum Jülich in enger Zusammenarbeit mit der PTB mit einem Monte-Carlo-Ansatz untersucht, wie sich die radiometrischen Unsicherheiten großflächiger Kalibrierquellen durch die hochgradig nichtlinearen Retrieval-Algorithmen des Horizontsondierers GLORIA fortpflanzen. Dadurch konnten quantitative Anforderungen an die Kalibrierquellen bestimmt werden, um die von der Klimaforschung geforderten Unsicherheiten für die Endergebnisse zu erreichen. (C. Monte, FB 7.3, christian.monte@ptb.de)

### **Erster internationaler Vergleich der Leistungsmessung im Terahertz-Spektralgebiet**

Aufgrund der sich abzeichnenden zunehmenden Bedeutung der THz-Strahlung für die Prozessüberwachung und Sicherheitstechnik wurde ein erster internationaler Vergleich zur optischen Leistungsmessung im THz-Spektralgebiet in der PTB durchgeführt. Dazu wurden in der PTB unter Teilnahme des amerikanischen (NIST) und des chinesischen Metrologieinstituts (NIM) die spektralen Empfindlichkeiten der drei nationalen THz-Radiometer bei zwei Frequenzen eines THz-Lasers (2,52 THz und

0,762 THz) direkt miteinander verglichen. Die Messergebnisse stimmen sehr gut innerhalb der angegebenen Unsicherheiten überein. Dies erlaubt der PTB ihre Kalibrierdienstleistung bis zu 0,7 THz auszudehnen. (A. Steiger, FB 7.3, andreas.steiger@ptb.de)

### **Vergleich zur Bestimmung der Transmission von FIR-Filtern**

Reflexions- und Transmissionsgradmessungen im fernen infraroten Spektralbereich (FIR) und im THz-Bereich werden leicht durch die Eigenstrahlung der Probe und des Spektrometers verfälscht. Im Rahmen eines nationalen Vergleichs mit vier Partnerinstituten aus Industrie und Forschung wurden, koordiniert durch die PTB, die Transmissionsgrade von verschiedenen FIR- und THz-Filtern bestimmt und die abschließenden Ergebnisse im Rahmen eines PTB-Workshops diskutiert. (C. Monte, FB 7.3, christian.monte@ptb.de)

### **Projektstart „Enhancing process efficiency through improved temperature measurement“**

Im Mai dieses Jahres begann das EMPIR-Projekt „Enhancing process efficiency through improved temperature measurement“ (EMPRESS). Die 18 Projektpartner wollen durch optimierte Temperaturmessungen und durch die Erhöhung der Lebensdauer und der Zuverlässigkeit von Sensoren die Effektivität und Energieeffizienz von Produktionsprozessen verbessern. Selbstüberprüfende Sensoren oder Methoden der „Vor-Ort-Kalibrierung“ sind Bausteine des Projekts. Die PTB entwickelt neuartige, auf Kohlenstoff basierende Thermolemente zur Messung hoher Temperaturen bis ca. 2000 °C und untersucht optimierte Platin-Rhodium-Legierungen für driftminimierte Temperaturmessungen bis 1500 °C. (F. Edler, FB 7.4, frank.edler@ptb.de)

### **Umfangreiche Forschungsvorhaben zur Weiterentwicklung der harmonisierten Fachgrundnorm EN 1434 „Heat Meters“ sind angelaufen**

Im Bereich der europäischen harmonisierten Fachgrundnorm EN 1434 „Heat Meters“ wurde die PTB durch das Europäische Normungsgremium CEN mit der Erarbeitung verschiedenerer neuer wissenschaftlicher Aufgabenstellungen betraut. Aktuelle Themen sind u. a. schnell ansprechende Wärme- und Kältezähler, im Feld durchgeführte Messgenauigkeitsprüfungen, Messbeständigkeitstests zur Voraussagung von Zeiträumen oberhalb von 10 Jahren, Wasser-Glykollgemische für Solarapplikationen, Einflüsse von abrupten Innengeometrie-, Durchfluss- und Temperaturänderungen auf das Messverhalten und Störkörperentwicklungen zur Detektion strömungs-

profilbedingter Einflussgrößen auf die Messrichtigkeit und Beständigkeit von Wärmehählern. (J. Rose, FB 7.5, juergen.rose@ptb.de)

## **Internationale Angelegenheiten**

### **Vergleich der Strahlungstemperaturen von –25 °C bis 100 °C mit dem CENAM**

Im Rahmen der wissenschaftlich-technischen Zusammenarbeit mit dem mexikanischen Metrologieinstitut CENAM erfolgte die Weitergabe der Strahlungstemperaturskala der PTB im Temperaturbereich von –25 °C bis 100 °C. Dazu wurden Vergleichsmessungen mit einem Transferinstrument an den Wärmehählern der PTB im Rahmen eines Aufenthalts eines Gastwissenschaftlers des CENAM durchgeführt. Es ergab sich eine gute Übereinstimmung der beiden Skalen im Rahmen der kombinierten Messunsicherheit des Vergleichsverfahrens. (B. Gutschwager, FB 7.3, berndt.gutschwager@ptb.de)

### **Zusammenarbeit mit dem NIST bei der Nachweisempfindlichkeit von Einzelphotonendetektoren**

Zur Vorbereitung einer CCPR-Pilotstudie mit dem Ziel, die Nachweisempfindlichkeit von Einzelphotonendetektoren mit geringer Unsicherheit zu bestimmen, haben Vergleichsmessungen zwischen NIST (USA) und PTB an dem Elektronenspeicherring der PTB, der Metrology Light Source, stattgefunden. Dazu wurden supraleitende Einzelphotonendetektoren unterschiedlicher Bauart sowohl mithilfe eines NIST-Kalibrierbaus als auch mithilfe von Synchrotronstrahlung kalibriert. Die Messungen lieferten wichtige Hinweise, wie die wesentlichen Unsicherheitsquellen bei zukünftigen Kundenkalibrierungen reduziert werden können. (I. Müller, FB 7.3, ingmar.mueller@ptb.de)

### **Vergleich von absoluter radiometrischer Temperaturmessung und ITS-90**

Die „Mise en Pratique“ des Kelvin erlaubt in Zukunft, primärthermometrische Verfahren direkt für die Darstellung und Weitergabe der Temperaturskala einzusetzen. Von diesen Verfahren ist vor allem die absolute radiometrische Temperaturmessung für die Realisierung der ITS-90 im Temperaturbereich oberhalb von 1000 °C auch praktisch geeignet. Um die Praxistauglichkeit nachzuweisen, wurden an der PTB gemeinsam mit dem LNE (Frankreich), CEM (Spanien) und MIKES (Finnland) verschiedene Messverfahren und Messgeräte bei Temperaturen bis zu 2500 °C verglichen. Dabei kamen abbildende und nicht-abbildende Radiometer zum Einsatz,

deren Rückführung teils gemäß der ITS-90, teils absolut-radiometrisch erfolgte. Die Übereinstimmung lag deutlich innerhalb der Messunsicherheit, die bei 2500 °C etwa 1 K ( $k = 2$ ) betrug. (K. Anhalt, FB 7.3, klaus.anhalt@ptb.de)

### **Verbesserung der Regeln für die Abschätzung der Unsicherheit von Fixpunkttemperaturen**

Die online publizierte Broschüre „Guide to the realization of the ITS-90“ enthält Empfehlungen des Konsultativkomitees für Thermometrie (CCT) zur Darstellung der Internationalen Temperaturskala ITS-90 auf höchstem metrologischen Niveau. Der Einfluss von Verunreinigungen in den Fixpunktmaterialien auf die Fixpunkttemperaturen verursacht in vielen Fällen die größte Unsicherheitskomponente. Auf Initiative der PTB hat das CCT nun verbesserte Regeln für die Abschätzung dieser Komponente beschlossen, die auf den Gesetzen der Kristallografie beruhen. Hierdurch werden Darstellung und Weitergabe der ITS-90 auf eine fundiertere Basis gestellt. (B. Fellmuth, FB 7.4, bernd.fellmuth@ptb.de)

### **CODATA-Workshop on the determination of the fundamental constants**

Als letzte Vorbereitung der CODATA-Ausgleichung (s. u.) fand vom 1. bis 6. Februar 2015 in Eltville am Rhein ein Workshop statt. 78 hochrangige Teilnehmer aus 11 Ländern diskutierten über den Stand der Bestimmung von Fundamentalkonstanten. Die PTB war mit zwei Beiträgen zur Neudefinition des Kelvins und zur Bestimmung der Boltzmann-Konstante vertreten. Am Rand der Konferenz organisierte die PTB ein Satelliten-Treffen der Arbeitsgruppe zur Neudefinition des SI im Konsultativkomitee für Thermometrie (CCT). Dort wurden die Diskrepanzen und die Korrelationen der Messungen mit akustischer Thermometrie zur Bestimmung der Boltzmann-Konstante besprochen und diese beiden bisher offenen Punkte zur Neudefinition des Kelvins abschließend geklärt. (J. Fischer, FB 7.4, joachim.fischer@ptb.de)

### **591. WE-Heraeus-Seminar on Astrophysics, Clocks and Fundamental Constants (ACFC 2015)**

Dimensionslose Naturkonstanten wie die Feinstrukturkonstante und die Massenverhältnisse von Elementarteilchen sind in dem Sinne fundamental, dass Bewohner eines anderen Planeten auf dieselben Werte stoßen sollten. Bislang müssen diese aus Messungen abgeleitet werden und relativieren damit die Vorhersagekraft existierender Theorien. Diese Wissenslücke ist Motivation, nach unbekanntem Phänomenen wie der Möglichkeit sich langsam ändernder Naturkonstanten zu suchen. Mit Atomuhren lassen

sich die genauesten Messungen überhaupt durchführen, während astrophysikalische Beobachtungen einen Blick in die Geschichte des Universums und auf die früheren Werte der Naturkonstanten erlauben. Dies ist das verbindende Element im 591. WE-Heraeus-Seminar, das vom 27. bis 30. Mai 2015 im Physikzentrum Bad Honnef stattfand. Die PTB organisierte den Programmteil zu den Naturkonstanten, die 2018 als Basis für die Neudefinition der Einheiten dienen. (J. Fischer, FB 7.4, joachim.fischer@ptb.de)

### **Metrologia-Ausgabe „Focus on the Boltzmann Constant“**

Wenn Änderungen an den Definitionen der SI-Einheiten vorgenommen werden, dürfen diese nicht zu Sprüngen in den Messwerten führen. Daher muss der Wert der Boltzmann-Konstante, auf dem die neue Definition des Kelvins basieren wird, so konsistent wie möglich mit der aktuellen Definition übereinstimmen. Somit besteht der erste Schritt der Neudefinition darin, die Boltzmann-Konstante bestmöglich am Wassertripelpunkt zu messen. Glücklicherweise stehen dafür vier verschiedene Techniken zur Verfügung: akustische Gasthermometrie, Dielektrizitätskonstanten-Gasthermometrie, Rauschthermometrie und Dopplerverbreiterungs-Thermometrie. Die beiden Gasteditoren aus dem neuseeländischen Metrologieinstitut und der PTB haben Beiträge von über einem Dutzend Forschergruppen aus verschiedenen Laboratorien auf der ganzen Welt gesammelt, die die Boltzmann-Konstante gemessen haben. (J. Fischer, FB 7.4, joachim.fischer@ptb.de)

### **CODATA veröffentlicht neue Ausgleichung der Fundamentalkonstanten**

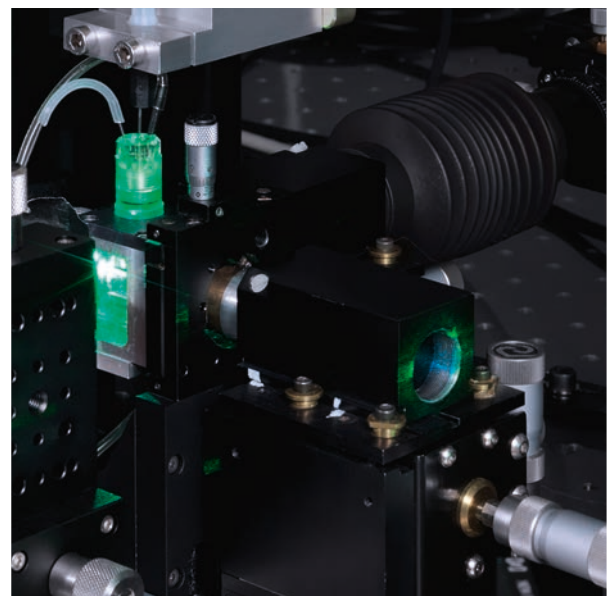
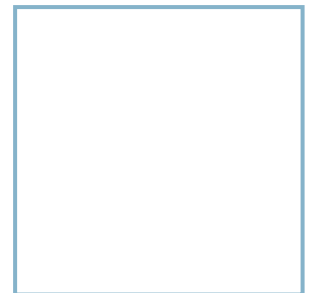
Die Arbeitsgruppe zu Fundamentalkonstanten in CODATA (Committee on Data for Science and Technology) hat ihre alle vier Jahre erscheinende Ausgleichung der Zahlenwerte von Fundamentalkonstanten abgeschlossen. Die Berechnung 2014 ist eine letzte Information über den Stand der erreichten Unsicherheiten vor der für das Jahr 2018 geplanten Neudefinition der SI-Basiseinheiten auf der Basis von Fundamentalkonstanten. Für die PTB besonders wichtig ist die Unsicherheit der Boltzmann-Konstante bzw. der Planck-Konstante als Grundlage der neuen Definition des Kelvins bzw. des Kilogramms. Die Unsicherheiten beider Konstanten haben bereits das erforderliche Niveau erreicht und Diskrepanzen zwischen unterschiedlichen Messungen sind aufgeklärt. Die für die Boltzmann-Konstante fehlende unabhängige Bestätigung des Zahlenwerts durch eine weitere Messmethode soll in 2016 durch die PTB erzielt werden. (J. Fischer, FB 7.4, joachim.fischer@ptb.de)





# Abteilung 8

## Medizinphysik und metrologische Informationstechnik



Seit Januar 2015 leitet Tobias Schäffter die Abteilung 8 *Medizinphysik und metrologische Informationstechnik*. Er war zuvor für den Bereich der Biomedizinischen Technik am King's College in London verantwortlich und hat dort insbesondere die biomedizinische Bildgebung in Lehre und Forschung vertreten. Eine wichtige Herausforderung in der Medizinphysik besteht in der Weiterentwicklung und im Einsatz quantitativer Messverfahren sowohl für bildgebende Verfahren als auch in der Laboratoriumsmedizin, um eine vergleichbare Diagnose und Therapiekontrolle zu gewährleisten. Daneben spielen Fragen der Messunsicherheit, Standardisierung und neue Entwicklungen in der Informationstechnologie eine wichtige Rolle. Um solche strategisch wichtigen Themenfelder anzugehen, ist eine enge interdisziplinäre Zusammenarbeit mit akademischen, industriellen und klinischen Partnern von essenzieller Bedeutung. Dazu werden in naher Zukunft insbesondere die lokalen Kooperationen der PTB mit der TU Berlin und der Charité durch gemeinsame Berufungen und Drittmittelprojekte weiter gestärkt.

### **Magnetresonanztomographie in anatomieangepassten Zielvolumina**

Die Magnetresonanztomographie (MRS) ermöglicht die nichtinvasive und quantitative Messung von Stoffwechselprodukten (Metaboliten) im Gehirn des lebenden Menschen. Die genaue Kenntnis dieser Metabolitkonzentrationen in bestimmten Hirnstrukturen erlaubt es, die Funktionsweise unseres Gehirns auf biochemischer Ebene zu untersuchen. Mit der Entwicklung neuer MRS-Methoden leistet die PTB deshalb einen wichtigen metrologischen Beitrag zur Objektivierung und Quantifizierung in den Neurowissenschaften und für mögliche Ansätze zur pharmakologischen Behandlung. Eine wichtige Voraussetzung der MRS ist die genaue Lokalisierung eines Zielvolumens („Voxel“). Konventionellerweise wird durch drei zueinander senkrechte Anregungsschichten ein rechteckförmiges Volumen selektiert, um in diesem Bereich die Metabolitenkonzentration zu messen. Dieses Verfahren hat zwei Nachteile: Zum einen sind quaderförmige Voxel nicht an die Anatomie einer interessierenden Hirnstruktur angepasst. Zum anderen ist die Voxelposition frequenzabhängig, d. h. die verschiedenen Linien eines MR-Spektrums stammen aus leicht unterschiedlichen Regionen. In der PTB gibt es MR-Expertise nicht nur in der Gehirn-Spektroskopie, sondern auch auf dem Gebiet der räumlich selektiven

Anregung durch parallele Nutzung mehrerer Hochfrequenz-Antennen. Durch Zusammenführung dieser Kompetenzen konnte eine neue MRS-Sequenz mit dem Namen SHAVE („SHAPed Voxel Excitation“) mit verbesserten Lokalisierungseigenschaften entwickelt werden, die gleichzeitig in anderen wichtigen Qualitätskriterien nahezu das Niveau konventioneller MRS-Sequenzen erreicht (Bild 1). Auf der Jahrestagung 2015 der International Society for Magnetic Resonance in Medicine wurde die Vorstellung von SHAVE mit einem Summa-Cum-Laude-Award ausgezeichnet. Die quantitative MR-Spektroskopie wird in Zukunft in Forschungsprojekten mit externen Partnern eingesetzt. Die PTB hat zusammen mit der Charité erfolgreich einen DFG-Großgeräteantrag zu einem PET-MR gestellt, welches im Frühjahr 2016 installiert wird und einen direkten Vergleich der beiden Messverfahren des Metabolismus ermöglicht.

### **EMRP-Projekt zur Sicherheit von Patienten im MRT**

Koordiniert vom Fachbereich 8.1 *Medizinische Messtechnik* der PTB hatte ein europäisches Konsortium aus Wissenschaftlern dreier Metrologieinstitute und einer Universität drei Jahre lang zu metrologischen Aspekten der MRT-Sicherheit gearbeitet. Das Projekt mit dem Kurztitel „MRI Safety“ wurde 2015 abgeschlossen und der finale Projektbericht eingereicht. Patientensicherheit im MRT ist unmittelbar mit der Frage verbunden, wie sich die hochfrequenten (HF) elektromagnetischen Felder, die für eine MRT-Aufnahme benötigt werden, im menschlichen Körper verteilen. Insbesondere kann eine lokale Erhöhung von HF-Feldern zu einer lokalen Erwärmung führen, die vermieden werden muss. Die Verwendung von mehrkanaligen Sendesystemen (parallel transmission, pTx) ermöglicht es die Verteilung im Körper zu beeinflussen, um lokale Erwärmungen bei guter MR-Bildqualität zu gewährleisten. Da Messungen innerhalb des menschlichen Körpers nur in Ausnahmefällen möglich sind, lassen sich viele Fragen nur durch numerische Simulationen und deren messtechnische Validierung in Prüfkörpern („Phantomen“) beantworten. An der PTB wurden dazu geeignete Prüfkörper und Messverfahren entwickelt. Bei den Prüfkörpern wurden Gemische auf Basis von Polyethylen-Glykol (PEG) in Bezug auf ihre dielektrischen Eigenschaften charakterisiert und im MRT vermessen.

Ein weiterer Schwerpunkt war die Untersuchung der HF-Belastung bei MRT mit „ultrahohen“ Magnetfeldern (7 Tesla und höher), da diese nicht-linear mit

Titelbild:

Optisches Durchflussszcytometer

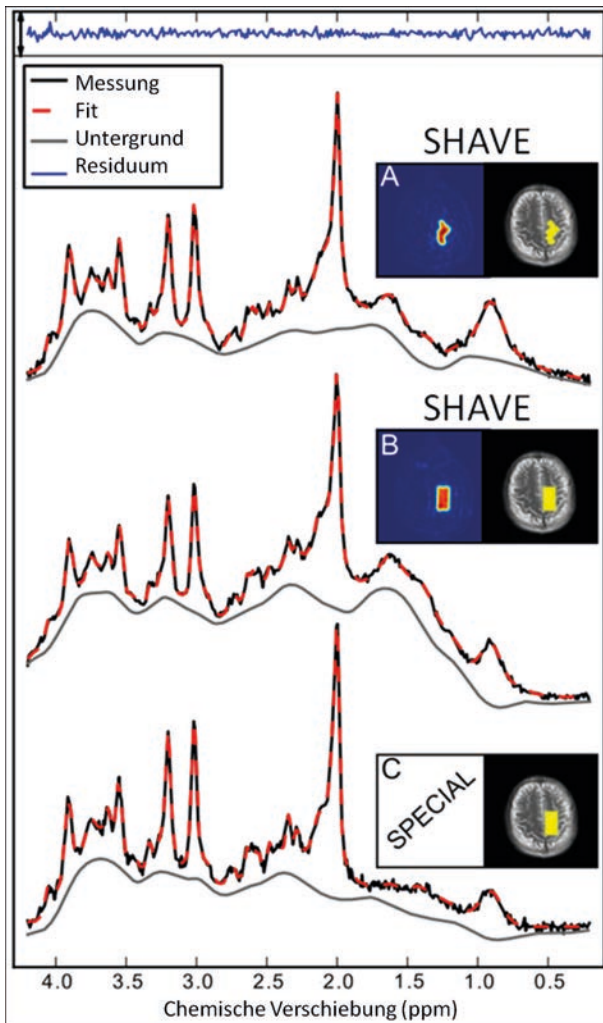
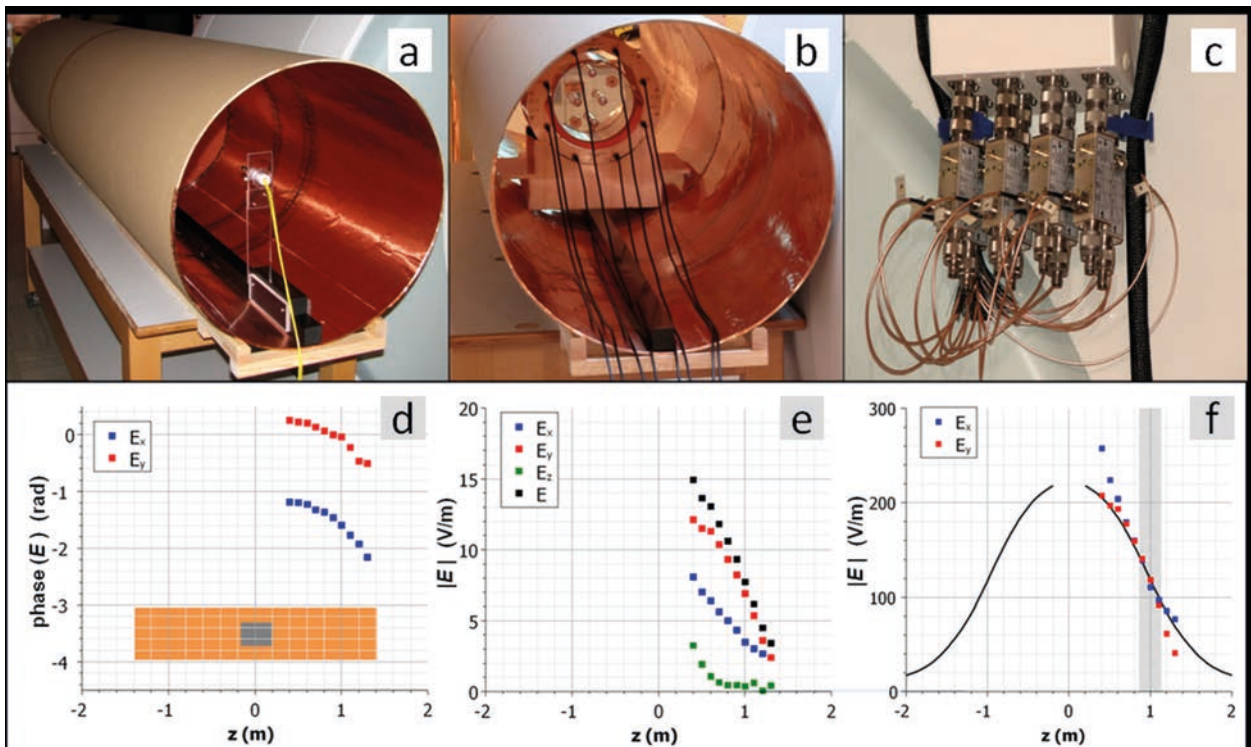


Bild 1: MRS-Spektren aus dem Gehirn eines gesunden Probanden, aufgenommen am 3-T-MRT mit SHAVE in einem anatomieangepassten Voxel (oben) und mit der konventionellen MRS-Sequenz SPECIAL in einem quaderförmigen Voxel (unten). Zum Vergleich wurde aus dem gleichen Voxel auch noch ein SHAVE-Spektrum akquiriert (Mitte). In der Analyse konnten 11 Metabolitkonzentrationen ohne signifikante Unterschiede zwischen den Sequenzen quantifiziert werden.

Bild 2: Messanordnung und Ergebnisse zur Bestimmung der Leistungsbilanz einer 7-T-pTx-Spule. a) Sensor für hochfrequente E-Felder am Ende des  $TE_{1,1}$ -Wellenleiters. b) 8-Kanal-pTx-Spule im Zentrum des Wellenleiters. c) Mit acht bidirektionalen Kopplern im MRT-Sendepfad können komplexe S-Parameter-Matrizen in situ gemessen werden. Messergebnisse für den Phasengang (d) und die Amplitude (e) verschiedener E-Feldkomponenten entlang der Wellenleiterachse. HF-Spule und Wellenleiter sind in Grau bzw. Braun angedeutet. f) Skalierte x- und y-Komponente des abgestrahlten E-Feldes zusammen mit einer simulierten Verteilung. Die Daten sind bei  $z = 1$  m auf den Theoriewert normiert, aus dem Normierungsfaktor ergibt sich die abgestrahlte Leistung für beide Polarisationsrichtungen.



der Feldstärke steigt. Dabei war es notwendig, einen speziellen Messaufbau aus einem 3,40 m langen Wellenleiter und einem kalibrierten E-Feldsensor zu entwickeln, um die gesamte abgestrahlte Leistung bei diesen hohen Frequenzen zu untersuchen. Daneben wurden auch Messungen am 3-Tesla-Tomografen an der PTB durchgeführt, um die Feldverteilung und die sich daraus ergebende Erwärmung bei dieser klinisch relevanten Feldstärke zu untersuchen. Darüber hinaus wurde das entwickelte Messsystem zur Demonstration auch für Außer-Haus-Messungen am MRT-System im Max-Planck-Institut für Bildungsforschung genutzt (Bild 2).

Ein wichtiges Zukunftsthema aus dem Bereich der MR-Sicherheit ist die spezifische Gefährdung für Patienten mit metallischen Implantaten. Diese hochaktuelle Frage, von der nach Schätzungen fast 10 % der EU-Bevölkerung unmittelbar betroffen sind, konnte im Rahmen des abgelaufenen EMRP-Projekts nur angerissen werden, wird jedoch im Zentrum geplanter zukünftiger Forschungsprojekte mit akademischen und industriellen Partnern stehen.

### **„NanoMag“ – ein EU-Projekt zur Standardisierung der Messverfahren für magnetische Nanopartikel**

Magnetische Nanopartikel sind aufgrund ihrer interessanten und vielversprechenden Einsatzmöglichkeiten in der biomedizinischen Technik seit einigen Jahren Gegenstand intensiver Forschung. Eine ganze Reihe von Anwendungen hat bereits ihren Weg in die medizinische Praxis gefunden. Aufgrund ihrer Wechselwirkung mit magnetischen Feldern können magnetische Nanopartikel als Transportvehikel dienen, um Proteine, DNA und andere Biomaterialien aus biologischen Medien wie Blut, Serum oder Zellkulturen zu extrahieren. Ebenso lassen sich mit externen Magnetfeldern die magnetischen Nanopartikel in bestimmten Körperregionen wie zum Beispiel in Tumoren anreichern und dabei zum Transport von pharmazeutischen Wirkstoffen nutzen. Über magnetische Wechselfelder kann außerdem mithilfe der Nanopartikel am Anreicherungsort zusätzlich Wärme erzeugt werden, was zu einer nachhaltigen Schädigung von Tumorzellen beiträgt. Mittels geeigneter Bildgebungsverfahren kann man die Verteilung der magnetischen Nanopartikel im Körper nichtinvasiv sichtbar machen und so zum Beispiel den Weg markierter Biomoleküle und Zellen verfolgen. Neben etablierten Verfahren wie der Magnetresonanztomografie können auch neue Verfahren eingesetzt werden, wie die Magnetrelaxometrie oder

Magnetic Particle Imaging. Die PTB hat zusammen mit der Charité erfolgreich einen DFG-Großgeräteantrag zu einem Magnetic-Particle-Imaging-System gestellt, welches dieses Jahr installiert wurde.

Für alle diesen neuen Anwendungen ist es wichtig, die wesentlichen physikalischen Eigenschaften der magnetischen Nanopartikel möglichst gut zu kennen und messtechnisch überprüfen zu können. Dieses Ziel verfolgt ein Konsortium von 17 europäischen Universitäten, Unternehmen und Forschungsinstituten im Rahmen des EU-Projekts „NanoMag – Nanometrology Standardization Methods for Magnetic Nanoparticles“. Die PTB koordiniert in diesem Projekt die beiden zentralen Arbeitspakete „Analyse magnetischer Nanopartikel“ und „Standardisierung magnetischer Nanopartikel“. Die Finanzierung des Projektes ist innerhalb des 7. Rahmenprogramms für Forschung und technologische Entwicklung (FP7) der EU für die Jahre 2013 bis 2017 vorgesehen. Neben der Herstellung von magnetischen Nanopartikeln werden auch die wesentlichen physikalischen Eigenschaften der Partikel definiert und systematisch untersucht. Ausgangspunkt dafür ist eine Übersicht über die geeigneten Messmethoden und ihre umfassende Beschreibung. Während für eine Reihe von physikalisch-chemischen und strukturellen Parametern von Nanopartikeln, beispielsweise für die Bestimmung der Größenverteilung, schon validierte und standardisierte Messmethoden vorliegen, wird insbesondere für die metrologische Charakterisierung der magnetischen Eigenschaften der Nanopartikel Neuland betreten. Gegenstand der Untersuchungen an der PTB sind dabei die zuverlässige Bestimmung der Magnetisierungskurve der Nanopartikel sowie die Untersuchung des Zeitverlaufs ihrer Magnetisierung bei zeitabhängigen äußeren Magnetfeldern. Bei der Interpretation der Ergebnisse stellen die geringe Konzentration der magnetischen Nanopartikel im Anwendungsfall sowie die Abhängigkeit der Ergebnisse von der Wechselwirkung der Partikel untereinander und mit der biologischen Umgebung große Herausforderungen dar.

Die bisher gewonnenen Erkenntnisse wurden bereits in mehreren Publikationen niedergelegt. Darüber hinaus beteiligt sich die PTB aktiv an der Erstellung einer neuen internationalen Norm für die Charakterisierung flüssiger Suspensionen magnetischer Nanopartikel, die in der Arbeitsgruppe ISO/TC229/WG4 „Nanotechnologies – Material Specifications“ vorbereitet wird.



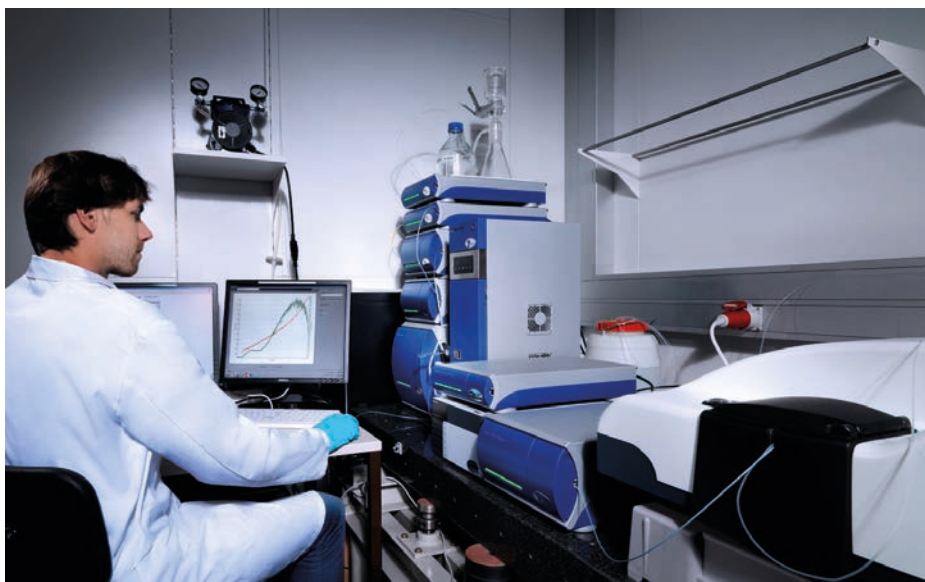


Bild 3: Messtechnische Überprüfung der physikalischen Eigenschaften von magnetischen Nanopartikeln mithilfe einer erweiterten Feld-Fluss Fraktionieranlage. Mit dieser Weiterentwicklung der PTB lassen sich erstmals die magnetischen Eigenschaften magnetischer Nanopartikel, nach hydrodynamischen Größen unterteilt, im Fluss untersuchen.

Auf dem EuroNanoForum 2015 in Riga wurde das Projekt „Nanomag“ in die „Top 10“ der über 1000 EU-Projekte im Bereich „Nanotechnologie/Neue Materialien“ gewählt. Das EuroNanoForum ist eine EU-Nanotechnologiekonferenz mit über 1000 Teilnehmern, die seit 2003 zweijährlich von der jeweils aktuellen EU-Ratspräsidentschaft organisiert wird.

Neben dem europäischen Projekt gibt es von der DFG-geförderte Forschungsprojekte, welche die Anwendung von magnetischen Nanopartikel untersuchen (DFG-Schwerpunktprogramm und DFG Einzelantrag). Die PTB ist in diesen Projekten ein wichtiger Partner zur Charakterisierung der Nanopartikel und Entwicklung von Referenzverfahren. Insgesamt ergibt sich ein wachsender nationaler und internationaler Bedarf für die Metrologie der magnetischen Nanopartikel sowohl in der akademischen Forschung als auch in der industriellen Verwertung. Die PTB stellt sich dieser Herausforderung und hat basierend auf langjährigen Erfahrungen zu diesem Thema eine neue Arbeitsgruppe gegründet (Bild 3).

### **Durchflussanalytische Messverfahren für den Submikrometer- und Nanometerbereich**

Durchflussanalytische Messverfahren, die darauf abzielen, biologisch relevante Partikel im Einzählverfahren zu erfassen und zu charakterisieren, werden seit vielen Jahren als diagnostische Werkzeuge unter anderem in der Laboratoriumsmedizin und in der biomedizinischen Forschung erfolgreich eingesetzt. Hierzu zählen insbesondere durchflusszytometrische Messverfahren zur Zählung und Konzentrationsbestimmung von Blutzellen im Blut sowie von Zellen in anderen Körperflüssigkeiten. Im Fachbereich 8.3 *Biomedizinische Optik* der PTB

werden auf diesem Gebiet metrologische Pionierarbeiten zur Entwicklung und Bereitstellung von Messverfahren für die absolute Zählung von Zellen als Referenzmessmethoden durchgeführt. Mithilfe der von der PTB durch Zellzählung ermittelten Referenzmesswerte wird auf diese Weise für bestimmte Messgrößen die metrologische Rückführbarkeit der Messergebnisse im Rahmen gesetzlich vorgeschriebener Vergleichsmessungen in der Laboratoriumsmedizin gewährleistet.

Die durchflussanalytische Detektion immer kleinerer Partikel im Submikrometer- und Nanometerbereich, bis hin zu DNA-Fragmenten, ist in letzter Zeit wieder stärker in den Fokus gerückt. Im EMRP-Projekt „Metrology for monitoring infectious diseases, antimicrobial resistance, and harmful microorganisms“ wurden von der PTB entsprechende Zählverfahren entwickelt, um deren Vorteile und Potenziale insbesondere zur genaueren Konzentrationsbestimmung von Viren und Bakterien einsetzen zu können. Messverfahren, die darauf beruhen, biologisch relevante Objekte wie Zellen oder Moleküle, aber auch Mikroorganismen wie Viren oder Bakterien direkt zu zählen, können unter bestimmten Bedingungen unmittelbar zur Realisierung der SI-Einheit für die Stoffmenge (Mol) herangezogen werden.

Im Rahmen des o. g. Projektes wurde weiterhin ein hochempfindliches Durchflussanalytisches System entwickelt, mit dem die Konzentration fluoreszenzmarkierter DNA-Fragmente gemessen werden kann. Dabei korreliert die gemessene Fluoreszenzintensität mit der Größe der DNA-Fragmente. So wird neben der Anzahl der Fragmente gleichzeitig ihre Größe bestimmt. In Kombination mit der ebenfalls in der PTB entwickelten hochgenauen Volu-

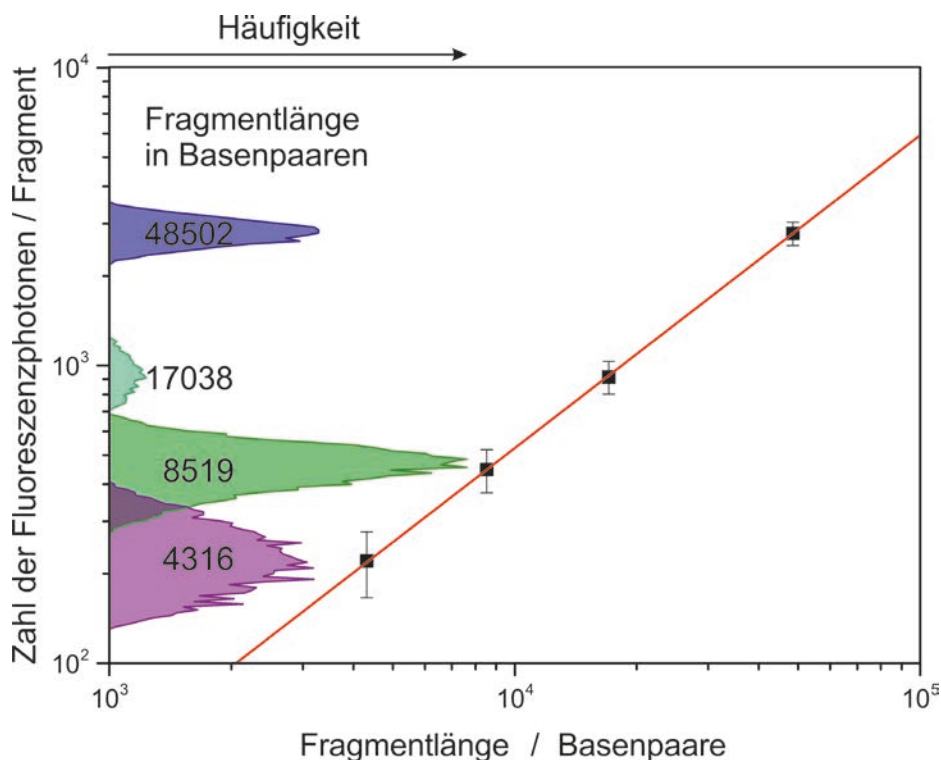


Bild 4: Gemessene Fluoreszenzintensität präparierter DNA-Fragmente in Abhängigkeit von ihrer nominellen Länge in Basenpaaren. Auf der linken Seite sind die Anzahlverteilungen der gemessenen Fluoreszenzintensitäten für die unterschiedlichen DNA-Fragmente dargestellt. Die aus diesen Verteilungen erhaltenen Schwerpunkte und Standardabweichungen ergeben die dargestellten Datenpunkte. Die lineare Regression für diese Datenpunkte zeigt einen sehr guten linearen Zusammenhang der Fluoreszenzintensität mit der Fragmentlänge (rote Gerade).

mendosierung kann die Anzahlkonzentration der DNA-Fragmente mit geringer Messunsicherheit bestimmt werden. Die digitale PCR ist eine orthogonale Methode zur Bestimmung der Konzentration von DNA-Fragmenten. Erste Vergleichsmessungen mit der digitalen PCR zeigen, dass beide Methoden ein hohes Potenzial zur Realisierung eines Referenzmessverfahrens zur Bestimmung der Konzentration von DNA-Fragmenten haben (Bild 4).

**Mathematische Modellierung und Datenanalyse**

Der Fachbereich 8.4 forscht an metrologisch relevanten mathematischen und statistischen Fragestellungen und unterstützt damit die experimentellen Bereiche der PTB an vielen Stellen.

Schwerpunkte sind die statistische Datenanalyse zur Auswertung von Messungen, numerische Verfahren zur Simulation von partiellen Differentialgleichungen, Entwicklung mathematischer Modelle und die Bestimmung von Messunsicherheiten.

**Schwerpunkt 2015: Erfolgreicher Abschluss eines europäischen Projekts zu mathematischen Methoden für die Bestimmung von Messunsicherheiten**

Das EMRP-Projekt „Novel mathematical and statistical approaches to uncertainty evaluation“ wurde im Jahr 2015 erfolgreich abgeschlossen. Die PTB hat dieses Projekt koordiniert und auch in der wissen-

schaftlichen Forschung maßgeblich begleitet. Als wesentliche Ergebnisse des Projekts sind drei Leitfäden zu den neu entwickelten Verfahren zu den Themen (i) Regression und inverse Probleme, (ii) computeraufwendige Messmodelle und (iii) Konformitätsbewertungen erstellt worden. Die Leitfäden („Best practice guides“) enthalten jeweils eine allgemeine Einführung in die Thematik und einen Überblick über die Grundlagen sowie eine Beschreibung der erarbeiteten Fallstudien. Die Fallstudien decken dabei ein ganzes Spektrum relevanter metrologischer Anwendungen ab, die von der Molekularbiologie und Biochemie über klassische Felder wie Durchfluss und Bestimmung thermophysikalischer Eigenschaften bis hin zu Zukunftsthemen wie Nanometrologie reichen. Im Ergebnis wurden ca. fünfundzwanzig Artikel in wissenschaftlichen Zeitschriften zu diesen Themen publiziert, wobei die PTB in fünfzehn Fällen federführend war. Die wesentlichen Ergebnisse des NEW04-Projektes sowie die drei Leitfäden wurden in einem internationalen Helmholtz-Seminar im April 2015 für interessierte Metrologen und die Stakeholders des Projektes vorgestellt. Darüber hinaus wurde auf Initiative der PTB ein virtuelles Zentrum gegründet, das zukünftige Aktivitäten in dem Bereich Mathematik und Statistik für die Metrologie europaweit koordinieren wird (Bild 5).

Die wissenschaftlichen Beiträge der PTB im Projekt NEW04 konzentrierten sich zum einen auf die Behandlung von Regressions- und parametrischen inversen Probleme mittels Bayesscher Methoden.

A GUIDE TO BAYESIAN INFERENCE  
FOR REGRESSION PROBLEMS

Clemens Elster<sup>1</sup>, Katy Klauenberg<sup>1</sup>, Monika Walzel<sup>1</sup>, Gerd Wübbeler<sup>1</sup>, Peter Harris<sup>2</sup>, Maurice Cox<sup>2</sup>, Clare Matthews<sup>2</sup>, Ian Smith<sup>2</sup>, Louise Wright<sup>2</sup>, Alexandre Allard<sup>3</sup>, Nicolas Fischer<sup>3</sup>, Simon Cowen<sup>4</sup>, Steve Ellison<sup>4</sup>, Philip Wilson<sup>4</sup>, Francesca Pennechè<sup>5</sup>, Gertjan Kok<sup>6</sup>, Adriaan van der Veen<sup>6</sup>, Leslie Pendrill<sup>7</sup>

<sup>1</sup>Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Germany

<sup>2</sup>National Physical Laboratory (NPL), UK

<sup>3</sup>Laboratoire National de métrologie et d'essais (LNE), France

<sup>4</sup>LGC Ltd., UK

<sup>5</sup>Istituto Nazionale Di Ricerca Metrologica (INRIM), Italy

<sup>6</sup>VSL – Dutch Metrology Institute, the Netherlands

<sup>7</sup>SP Technical Research Institute of Sweden, Sweden



Zum anderen wurden „smarte“ Samplingverfahren und Surrogatmodelle zur Unsicherheitsbestimmung in computeraufwendigen Modellen entwickelt. Regressionsprobleme treten in der Metrologie sehr häufig auf, so z. B. bei vielen Kalibrieraufgaben. Zu deren Behandlung werden derzeit zumeist „Least-Squares“-Methoden verwendet. Eine Alternative hierzu stellen Bayes'sche Verfahren dar. Der Vorteil dieser Verfahren gegenüber „Least-Squares“-Methoden ist, dass Vorinformation in natürlicher Weise berücksichtigt wird und dass Wahrscheinlichkeitsverteilungen für die interessierenden Größen errechnet werden können. Die der Bayes'schen Behandlung zugrundeliegende statistische Modellierung ermöglicht es in vielen Fällen auch, realistischere Fehlermodelle für die Daten zu berücksichtigen, als es mit „Least-Squares“-Ansätzen möglich ist. Das Spektrum der gelungenen Entwicklungen reicht dabei von einer einfach anzuwendenden Bayes'schen Methodik für eine in der Metrologie häufig auftretende Klasse linearer Regressionsprobleme bis hin zu herausfordernden Problemstellungen in Molekularbiologie und Biochemie.

**Fallbeispiel für ein computeraufwändiges Messmodell: Verfahren zur Bestimmung von Messunsicherheiten in der Scatterometrie**

Ein prominentes Beispiel hierfür in der PTB ist die Auswertung von indirekten Messungen an Fotomasken (Scatterometrie), die in der Halbleiterindustrie zur Herstellung von Bauelementen verwendet werden. Die Auswertung der Daten geschieht dabei durch Vergleich von Messdaten mit Ergebnissen von Simulationen der Maxwell-Gleichungen mittels Finite-Elemente-Verfahren (FEM). Dabei wird numerisch die Geometrie bestimmt, für die die Simulationsergebnisse am besten mit den originalen Messdaten übereinstimmen. Messunsicherheiten

Bild 5: Titelblatt des Leitfadens zur Bayes'schen Behandlung von Regressionsproblemen und Gruppenbild vom Abschlussstreffen des Projekts NEW04 (PTB Berlin, April 2015)

werden in der Metrologie im Allgemeinen entsprechend des „Guide to the expression of uncertainty in measurement“ bestimmt. Für nichtlineare Probleme wie das inverse Problem der Scatterometrie wird die Verwendung der Monte-Carlo-Methode empfohlen, die aber sehr rechenintensiv ist. Innerhalb des EMRP-Projekts NEW04 wurden verschiedene Sampling-Methoden zur Bestimmung von Messunsicherheiten auf das inverse Problem der Scatterometrie angewendet und verglichen. Es konnte gezeigt werden, dass sich der Rechenaufwand gegenüber herkömmlichen Monte-Carlo-Methoden um den Faktor zehn reduzieren lässt, wenn ein sogenanntes Latin-Hypercube-Verfahren verwendet wird.

Für die Bestimmung von Unsicherheiten hat die bereits erwähnte Bayes'sche Methode in der Metrologie eine besondere Bedeutung. Allerdings erfordert die Anwendung Bayes'scher Methoden in der Regel bereits einen hohen Rechenaufwand per se, was dazu führt, dass die Methode nur eingeschränkt bei rechenintensiven Problemen anwendbar ist. Innerhalb des EMRP-Projektes wurden effiziente Approximationsmethoden entwickelt, die als Surrogatmodelle bezeichnet werden. Deren Verwendung erlaubt, die Bayes'sche Methode auch auf Messsysteme mit rechenintensiven Modellen anzuwenden. Die Surrogatmodelle reduzieren die notwendige Rechenzeit um mehrere Größenordnung, z. B. für die in der Bayes'schen Methode notwendige Markov-Chain-Monte-Carlo-Methode von mehr als hundert Prozessortagen auf unter eine Prozessorstunde. Am Beispiel des inversen Problems der Scatterometrie wurde die Funktionsweise demonstriert und Approximationsfehler für verschiedene Surrogat-



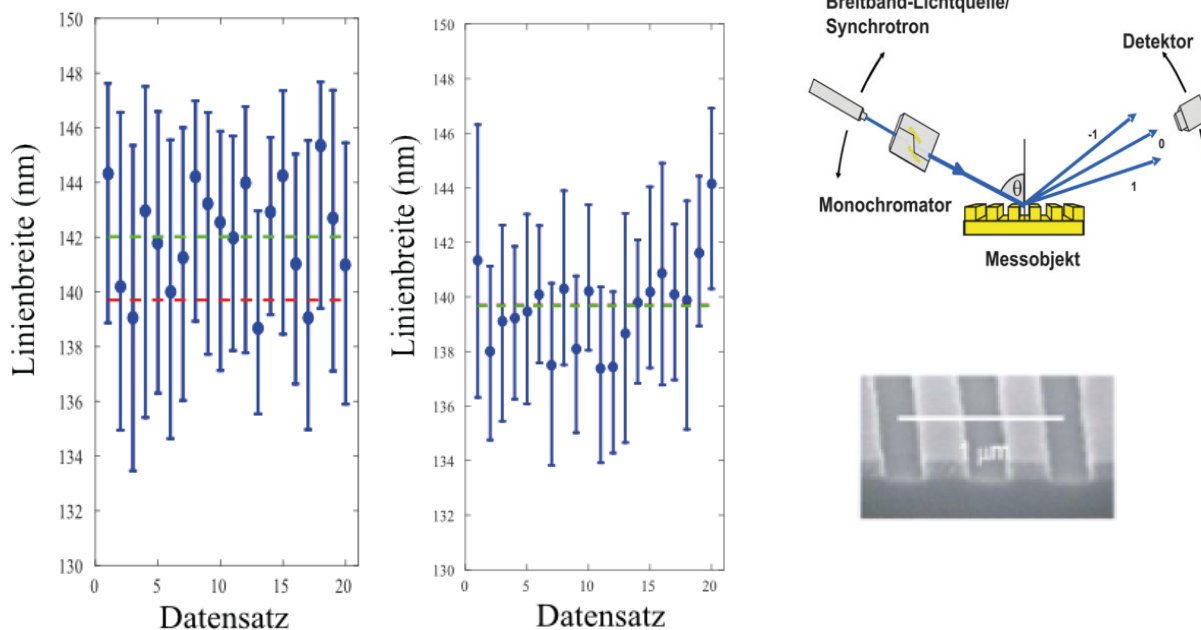


Bild 6: Prinzip der Scatterometrie (rechts oben) und rastermikroskopisches Bild einer Fotolithografiemaske (rechts unten) sowie Ergebnisse für die Bestimmung der Breite der Stege (grüne Linie) gegenüber einem bekannten Wert (rote Linie) inklusive der Messunsicherheiten für die Response-Surface-Methode (links) und die Polynomial-Chaos-Methode (Mitte). Es werden die Breiten der Stege für 20 verschiedene Daten für die beiden Verfahren gezeigt, die sich nur durch Messrauschen unterscheiden. Die Fehlerbalken repräsentieren ein Konfidenzintervall von 95 %.

modelle bestimmt. Die Methode des polynomialen Chaos erwies sich dabei einfacheren Ansätzen wie der Response-Surface-Methode deutlich überlegen, da sie bei vergleichbarem Rechenaufwand einen deutlich kleineren Approximationsfehler und kleinere Unsicherheiten für die kritischen Dimensionen ergibt (Bild 6).

## Informationstechnische Expertise für das gesetzliche Messwesen

Der Fachbereich 8.5 *Metrologische Informationstechnik* der PTB erfüllt wissenschaftlich-technische Querschnitts- und Dienstleistungsaufgaben auf dem Gebiet der Informations- und Kommunikationstechnik in der Metrologie. Er erbringt spezielle Beratungsleistung für die PTB-Labore, die Industrie sowie für Ministerien und Behörden. Des Weiteren vollzieht der Fachbereich die Bauartzulassung von IT-basierten Geldspielgeräten. Die zu formulierenden Anforderungen an die Systeme in beiden Bereichen werden aufgrund der verwendeten Informationstechnologie zunehmend ähnlicher. Die aktuelle technologische Entwicklung im Bereich der Informations- und Kommunikationstechnologie

(IKT), befeuert durch die europäische und nationale „Digitale Agenda“, führt zu neuen Bedarfen und steigenden Anforderungen an die bereits bestehenden Rolle des Fachbereichs 8.5 im Bereich Software und IT im gesetzlichen Messwesen, national wie international. Die Bundesregierung hat in ihrer Digitalen Agenda mehrere Technologiefelder identifiziert, wie z. B. Internet der Dinge, Cloud Computing, Industrie 4.0, Smart Services, intelligente Energienetze und Big Data. Die Metrologische Informationstechnik wählt aus diesen Feldern jene aus, von denen eine strategische Wirkung zu erwarten ist, und baut ihre Expertise im Sinne der Industrieförderung dort gezielt durch Forschungsarbeiten aus. Ein geeignetes Auswahlkriterium ist die Identifikation von übergreifenden treibenden Basis- bzw. Querschnittstechnologien wie dem Cloud Computing und sicheren eingebetteten Systemarchitekturen. Dafür wird durch die Verschränkung mit der Wissenschaftslandschaft Berlins durch gemeinsame Promotionen und die Beteiligung an der Helmholtz Research School on Security Technologies (HRSST), wo sich die Sicherheitskompetenz von allen Berliner Universitäten und der DLR bündelt, gesorgt. Um die Entwicklung dieses Gebietes in der PTB voranzutreiben, wird zusammen mit der TU Berlin eine Nachwuchsgruppe ausgeschrieben, die sich mit der Entwicklung von sichereren und vertrauenswürdigen netzangebundenen Systemarchitekturen für das Messwesen beschäftigt. Damit wird die internationale Führungsrolle der PTB im Bereich der Informations- und Kommunikationstechnologie im gesetzlichen Messwesen national wie international weiter gestärkt.



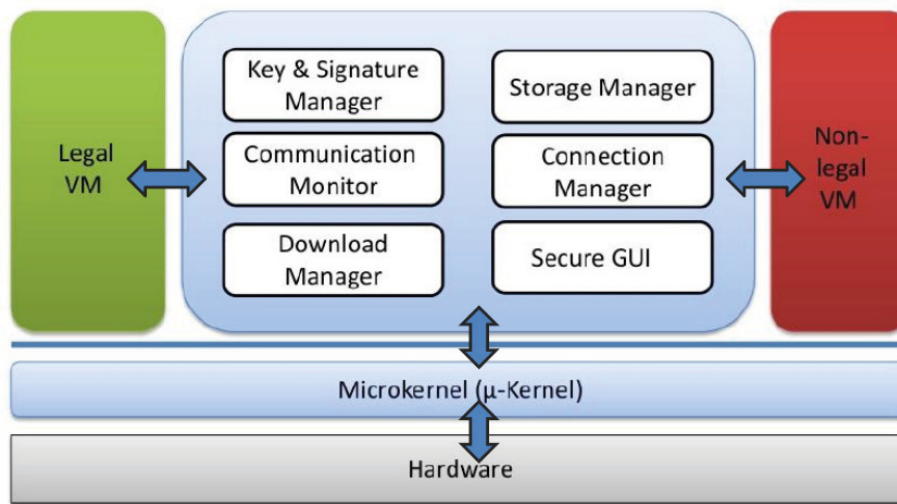


Bild 7: Kommunikation der einzelnen Module innerhalb der Systemarchitektur. Trennung der Software in ein Modul, d. h. eine virtuelle Maschine (VM), mit gesetzlich relevanter (legal) und einem Modul mit sonstiger Software (non-legal). Zusätzliche Modularisierung einzelner gesetzlich geregelter Funktionseinheiten, z. B. dem Download Manager.

### Technologietransfer

Um Herstellern von Messgeräten bei der Realisierung ihrer innovativen Produkte zu unterstützen und den Konformitätsbewertungsprozess zu verschlanken, entwickelt der Fachbereich 8.5 rechtskonforme Referenzarchitekturen für die oben benannten Anwendungen und veröffentlicht Handlungshilfen für deren Prüfung. Diese werden der Industrie im Rahmen von Technologietransferprojekten angeboten. Eine dieser Referenzarchitekturen für sichere eingebettete Systeme setzt sogenannte Separations- oder Mikrokerne und Virtualisierungstechniken ein, um Manipulationen der Software oder Angriffe auf das Betriebssystem über Schnittstellen, durch Schadsoftware oder das Internet effektiv abzuwehren (Bild 7). Die Sicherheitsarchitektur garantiert, dass angegriffene Einzelkomponenten des Systems nicht zu einem Ausfall des Gesamtsystems oder gar des Messprozesses führen. Damit wird die Integration des Messgerätes in offene Netzwerke auf sichere Weise ermöglicht.

Die Kommunikation zwischen den einzelnen Modulen und der Zugriff auf die Systemhardware wird über den Mikrokernel und den Communication Monitor geregelt und nachweisbar aufgezeichnet. So finden Zugriff und Kommunikation ausschließlich über legitimierte Module statt. Die Aufzeichnung der Kommunikation und der Zugriffe erlaubt auch die Detektion von unerlaubten Zugriffsversuchen im Sinne eines Logbuchs, das dann auch von den Marktaufsichtsbehörden eingesehen werden kann.

Diese Referenzarchitektur liegt in Form eines Demonstrators vor, in dem die höchsten Sicherheitsanforderungen im gesetzlichen Messwesen umgesetzt wurden. Dieser kann auf die Risikoklasse des jeweiligen Messgerätes skaliert werden.

Ebenso erarbeitet die PTB aktuell Referenzarchitekturen für das sichere Cloud Computing im gesetzlichen Messwesen. Auch hier mit dem Ziel, den Konformitätsbewertungsstellen harmonisierte Prüfanweisungen bereitzustellen und den Herstellern ein Regelwerk an die Hand zu geben, mit dem ausreichend Innovationsspielraum bleibt, sich von Konkurrenten abzuheben. Es wird ein besonderes Augenmerk auf die Identifikation von Zertifikaten (ISO 2700X, Notfallmanagement, Verfügbarkeit, Privacy, etc.) und der Vertragsgestaltung (Service Level Agreement, Serverlokalisierung, Datentransfer, etc.) zwischen Cloud-Nutzern und Cloud-Dienstleistern gelegt. Auf der anderen Seite werden neue Sicherungsverfahren für die Kommunikation untersucht und vertrauensbildende Maßnahmen gegen die als am größten empfundenen Bedrohungen, z. B. den Durchgriff von einem virtualisierten Kompartiment zum nächsten, oder nichtvertrauenswürdige Administratoren, zu entwickeln sein. Der Fachbereich arbeitet hier eng mit der Technischen Universität Berlin zusammen.

### Adäquate Sicherheitsanforderungen an Messgeräte

Im gesetzlichen Messwesen werden von neuen europäischen Richtlinien adäquate Sicherheitsmaßnahmen für das Produkt gefordert, um u. a. ein angemessenes und vergleichbares Sicherheitsniveau zu garantieren, aber auch um eine Sicherheitsüberfrachtung von innovativen Produkten zu vermeiden. Risikoanalyse und Risikobewertung sind in der europäischen Richtlinie (MID) und dem MessEG für den Hersteller von Messgeräten national verpflichtend. In diesem Kontext ist es sinnvoll, sich an internationalen Industrie-Standards zur Bewertung der Sicherheit von IKT-Komponenten zu orientieren, z. B. an den Common Criteria (ISO 15408). Auf

diese Weise entstehen objektive Vorgehensweisen zur Bewertung aktueller Angriffsvektoren, die ein Risiko für Messgeräte darstellen, z. B. durch deren Anbindung an offene Kommunikationsnetze. Die PTB hat auf Basis international akzeptierter Industriestandards ein innovationsoffenes, objektives und damit vergleichbares Verfahren zur Bewertung des Risikos von aktuellen Bedrohungen auf Messgeräten entwickelt und angewendet. Dieses Verfahren ist insbesondere für die Identifikation adäquater Sicherungsmaßnahmen bei innovativen Ansätzen, wie z. B. Industrie 4.0, geeignet. Die schützenswerten Güter ergeben sich dabei aus den Anforderungen der Rechtsnormen, die Angriffsvektoren bilden sich aus Erfahrungswerten der Konformitätsbewertungsstellen, der Marktaufsicht und anderer kompetenter Stellen im Bereich der IT-Sicherheit, die z. B. ihre Angriffsszenarien in Studien veröffentlichen. Es ist hier die Aufgabe, die für das gesetzliche Messwesen aktuell relevanten herauszufiltern und anzuwenden.

### **Neue Technische Richtlinie für Geldspielgeräte**

Am 10.11.2014 trat die sechste Verordnung zur Änderung der Spielverordnung (SpielV) in Kraft. Mit dem Ziel, die Prüfbarkeit zu sichern, die Durchführung der Bauartprüfung zu unterstützen sowie bauartabhängige Voraussetzungen für eine wirksame Überprüfung aufgestellter Spielgeräte festzulegen wurde von der PTB eine neue Technische Richtlinie entwickelt. Diese technische Umsetzung des Rechtstextes gibt den Herstellern von Geldspielgeräten Handlungssicherheit. Die Technische Richtlinie in der Version 5.0 (TR5.0) wurde bei der Europäischen Kommission zur Notifizierung eingereicht und liegt seit Mai 2015 in ihrer Endfassung vor. Die Besonderheiten der IT-basierten Spielgeräte stellen bei der Zulassungsprüfung qualitativ neue Ansprüche an das Sicherungskonzept der Spielgerätesoftware und der Daten, die vom Spielgerät generiert und insbesondere für die steuerlichen Erhebungen, auch außerhalb der Geräte, benötigt werden. Von zentraler Bedeutung ist dabei das Sicherheitsgutachten einer vom Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnologie anerkannten oder gleichwertigen Stelle, das vom Antragsteller zusammen mit dem Zulassungsantrag vorzulegen ist. Es wurden Kriterien für die Prüfung und Bewertung der Sicherheit von Geldspielgeräten ermittelt und mögliche Angriffsszenarien bezüglich der Software, der erfassten Daten, der personenungebundenen Identifikationsmittel, der Hardware und weitere zu beachtende Aspekte in die Technische Richt-

linie aufgenommen, die bei der Erstellung von Sicherheitsgutachten zu bewerten sind. Die Sicherheitsgutachten orientierten sich an den Common Criteria (ISO/IEC 15408), einem international anerkannten und regelmäßig erneuerten Standard zur Prüfung und Bewertung der Sicherheitseigenschaften von IT-Produkten. Unterstützt wird dies durch die Zusammenarbeit mit Forschungsinstitutionen wie dem Fraunhofer-Institut für Angewandte und Integrierte Sicherheit (AISEC).

## In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

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

### Grundlagen der Metrologie

#### Prozeduren für die umfassende sicherheitstechnische Charakterisierung von Multikanal-MR-Sendesulen

Im Fachbereich 8.1 wurde eine Simulationsplattform entwickelt, die eine umfassende sicherheitstechnische Charakterisierung von mehrkanaligen MR-Sendesystemen gestattet. Die Berechnung sicherheitsrelevanter Hochfrequenzgrößen erfolgt dabei auf der Basis von Simulationsrechnungen mittels kommerzieller Software. So können z. B. für beliebige Ansteuerbedingungen Feldprofile für den Vergleich mit Feldsensor-Messungen berechnet werden. Weiterhin wurde ein beschleunigter Code für die Pennes-Bioheat-Equation unter Verwendung von Grafikkarten (GPU) zur Berechnung der gewebespezifischen Temperaturen entwickelt. (F. Seifert, FB 8.1, [frank.seifert@ptb.de](mailto:frank.seifert@ptb.de))

#### Prototyp einer 8-Kanal-pTx-Spule mit hoher $B_1$ -Effizienz für die 7-Tesla-MRT erfolgreich erprobt

Durch umfangreiche Simulationsrechnungen wurde ein einfaches und robustes Design für eine 8-kanalige 7-T-Sendespule hoher  $B_1$ -Effizienz entwickelt und optimiert. Anhand des finalen Designs wurde ein Prototyp aufgebaut und am 7-T-MRT in Berlin-Buch erfolgreich erprobt. Damit steht erstmals ein Prototyp unter Verwendung des komplett simulierten Referenz-Designs zur Verfügung. (F. Seifert, FB 8.1, [frank.seifert@ptb.de](mailto:frank.seifert@ptb.de))

#### Sensorbasierte Messung von $B_1$ -Feldprofilen in Magnetresonanztomografen (MRT) außerhalb der PTB

Im Rahmen des EMRP-Projektes HLT06 „MR-Safety“ wurde ein sensorbasiertes Messsystem aufgebaut, das die Bestimmung gepulster HF-Feldgrößen in beliebigen Magnetresonanz Tomografen (MRT) gestattet. Das Messsystem kann dabei weitestgehend unabhängig von der spezifischen Hard- und Software des untersuchten MR-Tomografen arbeiten. Es wurden Messungen einschließlich einer vorhergehenden Kalibrierung mittels MR-TEM-Zelle an einem 3T-MRT außerhalb der PTB durchgeführt. (G. Weidemann, FB 8.1, [gerd.weidemann@ptb.de](mailto:gerd.weidemann@ptb.de))

#### Aufbau eines Lasersystems zum optischen Spinaustauschpumpen

Durch das sogenannte „optische Spinaustauschpumpen“ kann das erzielbare Kernspinsignal der Edelgasisotope  $^3\text{He}$  und  $^{129}\text{Xe}$  um mehr als vier Größenordnungen gesteigert werden. Derartige hyperpolarisierte Gase werden in der PTB gleichermaßen für Zwecke der biomolekularen Bildgebung und der physikalischen Grundlagenforschung erzeugt. Das Verfahren benötigt Lasersysteme mit hoher Lichtleistung und spektral angepasster Emissionslinie. Zur weiteren Verbesserung vorhandener Apparaturen wurde ein derartiges System in der PTB modular konzipiert und aufgebaut. Es kann damit für den jeweiligen Anwendungszweck adaptiert und optimiert werden. (W. Kilian, FB 8.1, [wolfgang.kilian@ptb.de](mailto:wolfgang.kilian@ptb.de))

#### AC-Spinnanregung in ultratiefen Magnetfeldern

Zur systematischen Untersuchung aller äußeren Einflüsse auf das Kernspinsensemble eines hyperpolarisierten Edelgases ist es notwendig, die Spinnanregung genau kontrollieren zu können. Hierfür wurde die bisher verwendete nichtadiabatische Anregung auf eine der klassischen NMR äquivalente Anregung mit magnetischen Wechselfeldern (AC-Anregung) erweitert. Die sehr niedrigen Larmorfrequenzen von wenigen Hertz in Verbindung mit den sehr langen Kohärenzzeiten von mehreren Stunden erlauben ungewöhnliche Spinmanipulationen und damit auch eine umfassende Charakterisierung der AC-Anregung. (W. Kilian, FB 8.1, [wolfgang.kilian@ptb.de](mailto:wolfgang.kilian@ptb.de); S. Knappe-Grüneberg, FB 8.2 [silvia.knappe-grueneberg@ptb.de](mailto:silvia.knappe-grueneberg@ptb.de))

#### Messunsicherheit bei quantitativer MRT

Im Rahmen einer multizentrischen Studie unter Führung des National Institute for Medical Research (NIMR) in London ist die PTB an der Entwicklung eines MR-Phantoms zu Überprüfung von Messungen der Relaxationszeiten ( $T_1$  und  $T_2$ ) beteiligt. Diese beiden Zeitkonstanten hängen von Art und Zustand eines biologischen Gewebes ab. Die orts aufgelöste Messung („mapping“) dieser Größen mittels MR-Bildgebung liefert wichtige diagnostische Information. Nach Festlegung und Optimierung der Phantom-Spezifikationen in ausgewählten Zentren, u. a. der PTB, wurden jetzt 20 Phantome kommerziell hergestellt und an beteiligte Forschungsinstitute (u. a. NIST, NHS, NIH, FMRI, PTB) verteilt. Eine wöchentliche Messung an allen

Zentren wird in einem Jahr zu belastbaren Aussagen über Messunsicherheiten innerhalb und zwischen den Scannern führen. Nach der jetzt begonnenen Messphase soll das Phantom kommerziell verfügbar werden. (R. Brühl, FB 8.1, ruediger.bruehl@ptb.de)

### **Abschluss des internationalen Forschungsvorhabens „BiOrigin“**

Im Mai 2015 kam das Projekt „BiOrigin – biomolecular origin of disease“ zum Abschluss. Im Rahmen einer dreijährigen Förderung durch das European Metrology Research Programme (EMRP) hat ein internationales Konsortium aus Wissenschaft und Industrie unter Federführung der Metrologieinstitute NPL, JRC und PTB die Funktionsmechanismen antimikrobieller Peptide mit komplementären und neuartigen Messmethoden und begleitender Simulationen analysiert. (L. Mitschang, FB 8.1, lorenz.mitschang@ptb.de)

### **Magnetische Schirmung mit einem Schirmfaktor nahe $10^6$ an der TU München**

Im Rahmen einer Kooperation mit der TU München (Prof. Fierlinger) wurde eine neue magnetische Schirmung entmagnetisiert und magnetisch vermessen. Im Inneren bietet die Schirmung mit Dimensionen von  $2,2\text{ m} \times 1,5\text{ m} \times 1,5\text{ m}$  Platz für hochempfindliche magnetische Experimente. Neben dem extremen Schirmfaktor bis hinab zu niedrigen Frequenzen hat die Schirmung nach der Entmagnetisierung auch ein reproduzierbares statisches magnetisches Restfeld von  $< 1\text{ nT}$  in einem zentralen Volumen von  $1\text{ m}^3$ . Die Schirmung bietet damit optimale Voraussetzungen für die geplanten gemeinsamen Spin-Präzession-Experimente zur physikalischen Grundlagenforschung. (M. Burghoff FB 8.2, martin.burghoff@ptb.de; A. Schnabel FB 8.2, allard.schnabel@ptb.de)

### **Entwicklung einer Kunststoffdatenbank für die Entwicklung empfindlicher Messtechnik**

Hochempfindliche magnetische Messsysteme werden oft aus Kunststoffen gefertigt, da sich diese leicht und flexibel verarbeiten lassen und zusätzlich geringe magnetische Verunreinigungen aufweisen. Zur Bestimmung des Restmagnetismus dieser Werkstoffe wurden geeignete Messverfahren ausgewählt und einheitliche Prüfverfahren entwickelt. Die qualitätsrelevanten Parameter der Werkstoffe wurden in einer ersten umfassenden Studie erhoben und in einer Datenbank hinterlegt. Diese liefert jetzt nicht nur eine Entscheidungshilfe bei der Materialwahl für die Geräteentwicklung, sondern ermöglicht auch die Vorabschätzung der erreichbaren Empfindlichkeit bei der Planung von neuen Mess-

systemen. Die Ergebnisse wurden in Zusammenarbeit mit dem PTB-Gerätebau im Rahmen einer Bachelorarbeit dokumentiert. (Dirk Gutkelch, FB 8.2, dirk.gutkelch@ptb.de)

### **Referenzmessverfahren zur Konzentrationsbestimmung von Zellen basierend auf Relativzählung im Rahmen des EMRP-Projektes BioSITrace**

Absolute Zellkonzentrationsbestimmungen in der klinischen zellulären Immunologie finden im überwiegenden Maße auf der Basis von Relativmessungen statt. Dabei wird die gesuchte Zellkonzentration einer Suspension zusammen mit der Konzentration von gefärbten Polystyrolpartikeln (Beads) bekannter Konzentration bestimmt. Im Rahmen des EMRP-Projektes BioSITrace wurden verschiedene Einflussgrößen, unter anderem Koinzidenzverluste, bei derartigen Relativzählungen quantifiziert und der Beitrag zur Messunsicherheit bei Verwendung von Kalibrationspartikeln bestimmt. Damit steht ein sekundäres Referenzverfahren auf Basis einer Relativzählung zur Verfügung, um mit in der Klinik verwendeten kommerziellen Durchflusszytometern rückführbare Zellkonzentrationen zu bestimmen. Die Konzentration der Kalibrationspartikel muss vorher mit einem primären Referenzverfahren bestimmt worden sein. (M. Kammel, FB 8.3, martin.kammel@ptb.de; A. Kummrow, FB 8.3, andreas.kummrow@ptb.de)

### **Pilotstudie zur Messung der Konzentration CD34 positiver (Stamm-)Zellen**

Die Konzentration von CD34-positiven Stammzellen ist eine wesentliche Messgröße für die Entscheidung, ob die Stammzellen aus dem Blut angereichert werden können oder aus dem Knochenmark entnommen werden müssen. Außerdem muss die Stammzellkonzentration vor Transplantationen gemessen werden, um den Behandlungserfolg z. B. bei einer Leukämiebehandlung sicherzustellen. Zusammen mit dem NIST (USA) und dem NIBSC (UK) hat die PTB eine CCQM-Studie organisiert, mit dem Ziel, lyophilisierte CD34-positive Stammzellen bezüglich der Eignung als Standard für eine interne und externe Qualitätssicherung zu untersuchen. Im Rahmen dieser Pilotstudie wird die Konzentration immunmarkierten CD34+ Zellen durch eine Relativmessung bezüglich der Konzentration von Kalibrationspartikeln bestimmt. Der Referenzwert für die Konzentration der Kalibrationspartikel wurde in der PTB mit einem primären Referenzverfahren der verwendeten Charge zugewiesen. Die Messungen wurden von 11 der teilnehmenden Laboratorien abgeschlossen und werden zurzeit ausgewertet. (M. Kammel, FB 8.3, martin.kammel@ptb.de)



### **DNA-Fragmentanalyse im Durchfluss**

Im Rahmen des EMRP-Projektes INFECT-MET wurde in der PTB ein hochempfindliches Durchflusszytometer entwickelt, mit dem einzelne fluoreszenzmarkierte DNA-Fragmente nachgewiesen und deren Konzentration gemessen werden kann. Dabei korreliert die gemessene Fluoreszenzintensität mit der Größe der DNA-Fragmente. So wird neben der Anzahl der Fragmente gleichzeitig ihre Größe bestimmt. In Kombination mit der ebenfalls in der PTB entwickelten hochgenauen Volumendosierung der Probe mittels einer kalibrierten Spritze erhält man mit geringer Messunsicherheit die Anzahlkonzentration der DNA-Fragmente. Erste Messungen und der Vergleich mit Ergebnissen aus der digitalen PCR zeigen das Potenzial dieser Methode als Referenzmethode zur Bestimmung der Konzentration von DNA-Fragmenten. (M. Hussels, FB 8.3, martin.hussels@ptb.de)

### **Modellgestützte Auswertung von Untersuchungen zur Oxygenierung und Validierung im Tiermodell**

Die im Rahmen einer tierexperimentellen Studie mit einem kombinierten Ansatz aus Nahinfrarotspektroskopie und invasiven Sonden erhobenen Messdaten wurden mithilfe eines auf Monte-Carlo-Rechnungen beruhenden Modells zur Lichtausbreitung in Gewebe ausgewertet. Dadurch ist eine Bestimmung der Absolutwerte der optischen Eigenschaften des Nierengewebes unter verschiedenen physiologischen Bedingungen erreicht worden. Aus diesen Eigenschaften wurden die Zeitverläufe der Konzentrationen von Oxy- und Desoxyhämoglobin und der Sauerstoffsättigung des Blutes abgeleitet. Die Ergebnisse wurden gemeinsam mit den Kooperationspartnern Institut für Vegetative Physiologie der Charité Berlin und Max-Delbrück-Centrum Berlin in den Zeitschriften „Biomedical Optics Express“ und „Acta Physiologica“ veröffentlicht. (D. Grosenick, FB 8.3, dirk.grosenick@ptb.de)

### **Forschungsprojekt zur Sicherheit in Smart-Grids**

Im EMRP-Forschungsvorhaben „Sensor Network Metrology for the Determination of Electrical Grid Characteristics“ werden zusammen mit dem Projektkoordinator NPL (Großbritannien) und neun weiteren Partnern neue Messverfahren für Sensornetzwerke und Methoden zur Netzbeobachtung entwickelt.

Im Rahmen dieses Forschungsprojekts wurde ein eigenes Arbeitspaket „Security and Standardisation“ eingerichtet, das partnerschaftlich vom Fachbereich 8.5 *Metrologische Informationstechnik* der PTB und dem Institut für Elektrische Energietechnik und En-

ergiesysteme der Technischen Universität Clausthal bearbeitet wird. Der Fachbereich 8.5 wird hier die Auswirkungen von Sicherheitsmaßnahmen zum Schutz von Sensornetzwerken unter besonderer Berücksichtigung neuer Netztopologien, der veränderten dynamischen Anforderungen an die Messtechnik und die Messstrategien untersuchen und bewerten. Ziel ist es, ein sicheres verteiltes Messsystem in einem Niederspannungs-„Microgrid“ zu entwickeln und aufzubauen. Neben der System-sicherheit werden der Frage der Veränderung des dynamischen Verhaltens des Gesamtsystems durch zusätzliche Sicherheitskomponenten besondere Aufmerksamkeit gewidmet. Für den Test der Messeinrichtung unter realen Bedingungen erfolgt gegenwärtig die Integration in das Microgrid der TU Clausthal. (J. Neumann, FB 8.5, joerg.neumann@ptb.de)

### **Metrologie für die Wirtschaft**

#### **Verbundvorhaben „MAPIT“ ausgezeichnet**

Dem vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Projekt „Magnetic Particle Imaging Technology (MAPIT)“ wurde von der Bundesforschungsministerin Professor Wanka der Titel „Ausgezeichnetes Projekt der Werkstoffforschung“ verliehen. In diesem Vorhaben arbeitet die PTB gemeinsam mit der Charité, der Universität Lübeck und den Unternehmen Philips, Bayer und Bruker seit 2010 an der Weiterentwicklung eines bildgebenden Verfahrens, bei dem magnetische Nanopartikel als Tracer genutzt werden. Mit dieser Ehrung wurden bisher erst drei der über 1000 Vorhaben des BMBF-Förderprogramms „WING“ ausgezeichnet. (O. Kosch, FB 8.2, olaf.kosch@ptb.de)

#### **MNPQ-Projekt: Rekonstruktion orts aufgelöster Farbspektren aus kontinuierlichen zeilenkamera-basierten Messungen**

Die spektrale Farbmessung ist in vielen Industriebereichen eine grundlegende Voraussetzung für die automatisierte Maschinensteuerung und Qualitätssicherung. Zusammen mit der Firma Chromasens GmbH und dem FB 4.2 wurde im Juli dieses Jahres ein MNPQ-Projekt gestartet, um für multispektral messende Zeilenkameras ein Verfahren zu entwickeln, welches basierend auf einer mathematischen Modellierung der Einflussgrößen eine robuste und verlässliche Rekonstruktion orts aufgelöster Farbspektren aus spektral zerlegten Messungen liefert. Das Projekt verbindet in der PTB vorhandenes Wissen in den Bereichen Farbmessung, Reflexion und Transmission, virtuelle Experimente, Statistik und Analyse dynamischer Messungen mit der prak-

tischen Expertise der Firma Chromasens. (S. Eichstädt, FB 8.4, sascha.eichstaedt@ptb.de; A. Schirmacher, FB 4.2, alfred.schirmacher@ptb.de)

### **Neues Verfahren zur Unsicherheitsbestimmung für spektrale optische Verteilungen**

Um moderne Lichtquellen wie z. B. LED-Leuchten zu charakterisieren, muss deren spektrale optische Verteilung erfasst werden. Aus den spektralen Verteilungen werden wesentlichen Kenngrößen wie z. B. Farbtemperatur oder Farbkoordinaten ermittelt, die in der industriellen Praxis von großer Bedeutung sind. Gemeinsam mit den PTB-Arbeitsgruppen *Photometrie* und *Hochtemperaturskala* sowie der TechnoTeam GmbH wurde ein Verfahren entwickelt, welches mithilfe einer Computersimulation eine zuverlässige Bestimmung der zugehörigen Messunsicherheit ermöglicht. (F. Schmähling, FB 8.4, franko.schmaehling@ptb.de)

### **SimOptDevice: Simulationstool für virtuelle optische Experimente**

Das an der PTB entwickelte Simulationstool SimOptDevice wurde für die Anwendung inverser Probleme ausgebaut. Damit kann es für Anwendungen in der Optik sowohl für die Vorwärtsrechnung als auch für die Rekonstruktion eingesetzt werden. Aktuell wird SimOptDevice für die Lösung der inversen Probleme bei der Tilted-Wave-Interferometrie verwendet. Ferner konnte eine weitere Anwendung von SimOptDevice im Bereich der Photometrie für das oben beschriebene MNPQ-Projekt „Rekonstruktion orts aufgelöster Farbspektren“ mit der Firma Chromasens realisiert werden. (M. Starvridis, FB 8.4, manuel.starvridis@ptb.de; I. Fortmeier, FB 4.2, ines.fortmeier@ptb.de)

### **Verfahren zur Ermittlung des Gesundheitszustandes von Batterien**

Im Rahmen der Elektromobilität ist die Bestimmung des Gesundheitszustands von Li-Ionenbatterien von hoher Bedeutung. Unter „Gesundheitszustand“ ist hierbei ein Maß für die noch speicherbare Energiemenge im Vergleich zur neuen Batterie zu verstehen. Gemeinsam mit der PTB-Arbeitsgruppe *Grundlagen der Elektrochemie und elektrochemische Energiespeicher* wurde ein statistisches Verfahren entwickelt, um aus relativ schnell zu messenden Impedanzspektren den Gesundheitszustand zu ermitteln. Das Verfahren wurde durch Vergleich mit zeitaufwendigen Messungen der Batteriekapazität validiert. (G. Wübbeler, FB 8.4, gerd.wuebbeler@ptb.de; J. Heine, FB 3.4, jessica.heine@ptb.de)

### **E-Mobility Projekt „On-Board Metering“ (OBM) abgeschlossen**

Das vom BMWi geförderte Forschungsvorhaben: „On Board-Metering“ (OBM) mit dem Ziel des Aufbaus einer flächendeckenden Ladeinfrastruktur für die Elektromobilität wurde erfolgreich abgeschlossen. Der Schwerpunkt der zweiten Stufe des Projektes lag auf einem umfangreichen Feldtest. Dabei wurden Prototypen entwickelt und unter realen Bedingungen erprobt und bewertet. Eine besondere Rolle spielten Fragen der Beurteilung der erarbeiteten Lösung hinsichtlich der Anforderungen des gesetzlichen Messwesens, der Datensicherheit und des Datenschutzes, der Skalierbarkeit und der Nutzerakzeptanz. Zum Abschluss des Projektes wurden ca. 200 Ladestellen in 4 Ländern betrieben.

Der Kerngedanke hinter „On-Board-Metering“ (OBM) bestand darin, dass die geladene elektrische Energie direkt im Fahrzeug gezählt wird. Dazu wurden im Feldtest MID-konforme Elektrizitätszähler implementiert, sodass mit diesen Geräten auch ohne Ausnahmegenehmigung der Eichbehörden mit Letztverbrauchern abgerechnet werden konnte. Zur technischen Überwachung der Feldversuche wurde eine Web-Anwendung aufgesetzt, die die Ladevorgangsdatensätze und die Gerätelogbuch-Daten auswertet. Ein besonderer Schwerpunkt war die Frage des internationalen Einsatzes des OBM-Systems mit mehreren nationalen Leitstationen. Es wurde ein Konzept entwickelt, das es ermöglicht, eine Systemsteckdose so zu parametrieren, dass sie von nationalen Leitstationen akzeptiert werden. (J. Neumann, FB 8.5, joerg.neumann@ptb.de)

### **Handlungssicherheit für Hersteller von Geldspielgeräten**

Am 10.11.2014 trat die sechste Verordnung zur Änderung der Spielverordnung (SpielV) in Kraft. Mit dem Ziel, die Prüfbarkeit zu sichern, die Durchführung der Bauartprüfung zu unterstützen sowie bauartabhängige Voraussetzungen für eine wirksame Überprüfung aufgestellter Spielgeräte festzulegen, wurde von der PTB eine Technische Richtlinie entwickelt. Diese technische Umsetzung des Rechtstextes gibt den Herstellern von Geldspielgeräten Handlungssicherheit. Um die Belange aller beteiligten Kreise zu berücksichtigen, führte die PTB zusammen mit dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) Konsultationsveranstaltungen mit Herstellern und Sachverständigen durch. Die Technische Richtlinie in der Version 5.0 (TR5.0) wurde bei der Europäischen Kommission zur Notifizierung eingereicht und liegt seit Mai 2015 in ihrer Endfassung vor.

Die Besonderheiten der IT-basierten Spielgeräte stellen bei der Zulassungsprüfung qualitativ neue Ansprüche an das Sicherungskonzept der Spielgerätesoftware und der Daten, die vom Spielgerät generiert und insbesondere für die steuerlichen Erhebungen, auch außerhalb der Geräte, benötigt werden. Von zentraler Bedeutung ist dabei das Sicherheitsgutachten einer vom Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnologie anerkannten oder gleichwertigen Stelle, das vom Antragsteller zusammen mit dem Zulassungsantrag vorzulegen ist. Die Sicherheitsgutachten orientiert sich an den Common Criteria (ISO/IEC 15408), welche ein internationaler anerkannter und regelmäßig erneuerter Standard zur Prüfung und Bewertung der Sicherheitseigenschaften von IT-Produkten sind. Unterstützt wird dies durch die Zusammenarbeit mit Forschungsinstitutionen wie dem Fraunhofer-Institut für Angewandte und Integrierte Sicherheit (AISEC). (G. Thomas, FB 8.5, gervin.thomas@ptb.de)

## **Anforderungen an Messsysteme mit Betriebssystem**

Durch technische Vorgaben der PTB wird der Industrie Handlungssicherheit bei der rechtskonformen Entwicklung ihrer Produkte gegeben. Moderne Betriebssysteme verfügen über ausgereifte Schutzmechanismen, die eine gute Basis zur Erfüllung der Anforderungen im gesetzlichen Messwesen bilden. In der Arbeitsgruppe 8.51 werden Anforderungen aus dem Mess- und Eichgesetz (MessEG) speziell für Messsysteme mit Betriebssystem abgeleitet. Diese stellen eine Ergänzung zu bereits existierenden Softwareanforderungen wie z. B. dem WELMEC-Leitfaden 7.2 dar. Die Anforderungen entstanden in Anlehnung an bereits existierende Vorgaben bzw. Empfehlungen zur sicheren Konfiguration, die von namhaften Sicherheitsinstituten, wie dem Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI) oder der National Security Agency (NSA), entwickelt wurden. Die Anforderungen beinhalten im Wesentlichen Vorgaben zur sicheren Konfiguration des Betriebssystems. Beispiele relevanter Einstellungen sind u. a.: der Ablauf des Bootprozesses, Beschränkung der Bedienmöglichkeiten, Schutz der eichrechtlich relevanten Programm- und Datenbereiche. (U. Grottker, FB 8.5, ulrich.grottker@ptb.de)

## **Metrologie für die Gesellschaft**

### **DFG-Großgerät MR-PET für die Berliner Gesundheitsforschung**

Einem Berliner Konsortium unter Führung der Charité-Klinik für Nuklearmedizin ist es gelungen, bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) ein klinisches MR-PET-Scanner einzuwerben. Dieses Gerät vereint die hohe Auflösung und den exzellenten Weichteilkontrast der Magnetresonanztomografie (MRT) mit der hohen Empfindlichkeit der Positronenemissionstomografie (PET). Diese neue Kombination ermöglicht die simultane Messung mit beiden Verfahren und kann sowohl für eine effiziente Diagnose als auch für neue Forschungsansätze genutzt werden. Das rund 5 Millionen Euro teure Gerät wird im Frühjahr 2016 auf dem Charité-Campus Virchow-Klinikum installiert. Die PTB ist wichtiger Partner in diesem Konsortium und konnte durch ihre methodische Kompetenz zum Erfolg des Antrags beitragen. Schwerpunkte der PTB-Forschung werden u. a. die Themenfelder bewegungskompensierte Bildrekonstruktion und Kreuzvalidierung der Glutamat-Quantifizierung im Gehirn mit PET und MR-Spektroskopie sein. (B. Ittermann, FB 8.1, bernd.ittermann@ptb.de)

### **Untersuchung der lokalen spezifischen Absorptionsrate und Gewebetemperatur bei einer 7-Tesla pTx-Kopfspule**

Die maximale lokale spezifische Absorptionsrate  $psSAR_{10g}$  ist nach IEC 60601-2-33 das grundlegende Maß für die sicherheitstechnische Beurteilung von mehrkanaligen HF-Sendespulen im MRT. Da das Risiko einer Gewebeschädigung jedoch von der maximalen Temperatur im Gewebe – und damit nur mittelbar vom „Heizterm“  $psSAR$  abhängt – wurde in einer aufwendigen Simulationsstudie für zwei verschiedene Körpermodelle und für jeweils >500 Ansteuerbedingungen die Korrelation zwischen diesen beiden Größen untersucht. Es stellte sich heraus, dass  $psSAR_{10g}$  kein guter Prädiktor für maximale Gewebetemperaturen ist. Darüber hinaus konnten robuste Betriebsmodi gefunden werden, bei denen die Grenzwerte sowohl für  $psSAR_{10g}$  als auch für die Gewebetemperatur eingehalten werden. (F. Seifert, FB 8.1, frank.seifert@ptb.de)

### **Erfolgreicher Abschluss des EMRP-Projektes HLT06 „MR Safety“**

Im März 2015 wurde das von der PTB koordinierte EMRP Projekt HLT06 „Metrology for next-generation safety standards and equipment in MRI“ erfolgreich abgeschlossen. Von dem internationalen Konsortium unter Federführung der nationalen Metrologieinsti-

tute INRIM (Italien), PTB und VSL (Niederlande) wurden über 20 Arbeiten in wissenschaftlichen Zeitschriften sowie über 60 Beiträge auf internationalen wissenschaftlichen Konferenzen publiziert. (B. Ittermann, FB 8.1, bernd.ittermann@ptb.de)

### Neurotransmitter als mögliche Biomarker psychiatrischer Erkrankungen

Veränderungen des Neurotransmitters Glutamat stehen schon lange im Verdacht an psychiatrischen Erkrankungen des Gehirns beteiligt zu sein. Ein in der PTB entwickeltes Verfahren zur quantitativen Bestimmung von Glutamat im lebenden Gehirn mit geringer Messunsicherheit mithilfe der Magnetresonanztomographie (MRS) wurde in einer Kooperation mit der Charité-Psychiatrie in zwei Studien zu Vergleichsmessungen an schizophrenen und bipolaren Patienten mit gesunden Kontrollpersonen eingesetzt. Bei den Patienten zeigten sich signifikante Abweichungen sowie Korrelationen der Glutamatkonzentration mit neuropsychologischen Parametern, der Erkrankungsdauer bzw. der Anzahl bipolarer Episoden. Bei der Schizophrenie deutet eine gleichzeitig MR-spektroskopisch detektierte Verringerung der Konzentration von N-Acetylaspartat, einem Biomarker für intakte neuronale Zellen, auf ein komplexes biochemisches Störungsmuster hin. (F. Schubert, FB 8.1, florian.schubert@ptb.de)

### Energieversorgung des Gehirns

Ketogene Diät wird in zunehmendem Maße als therapeutisches Mittel bei neurologischen Erkrankungen wie Epilepsie und neuerdings Demenzen untersucht. Dabei wird durch einen hohen Fettanteil der Nahrung die Energieversorgung des Gehirns von Glucose auf Ketonkörper umgestellt. In Kooperation mit der Charité-Neurologie wurde in der AG In-vivo-MRT ein Messverfahren für Ketonkörper auf der Grundlage der MR-Spektroskopie entwickelt. Dabei konnten nicht nur der Anstieg der durch die Diät gebildeten Ketonkörper als neue Resonanzlinien im MR-Spektrum, sondern auch das parallele Absinken der Glukosekonzentration im Gehirn quantifiziert werden. Diese neue Methodik kann bei dem neuen Therapieansatz zur Erforschung der Stoffwechselreaktionen und zur Überwachung genutzt werden. (F. Schubert, FB 8.1, florian.schubert@ptb.de)

### Biochemie des Gedächtnisses

Gedächtnistraining, aber auch nichtinvasive elektrische Gehirnstimulation können gerade bei älteren Menschen das Gedächtnis verbessern. Ob dieser Prozess nachhaltig ist, wird in einem Kooperationsprojekt mit der AG Kognitive Neurologie der Charité

untersucht. Wissenschaftler der AG In-vivo-MRT der PTB messen dafür quantitative Veränderungen des inhibitorischen Neurotransmitters GABA im Gehirn in Abhängigkeit von der Stimulation und im Vergleich zur Scheinstimulation. (F. Schubert, FB 8.1, florian.schubert@ptb.de)

### Seltene Erkrankungen besser verstehen

Die hohe Empfindlichkeit und spektrale Trennschärfe der MR-Spektroskopie bei „ultrahohen“ Magnetfeldern, wie z. B. 7 Tesla, erlaubt die nichtinvasive Quantifizierung von mehr als einem Dutzend Metaboliten im Humangehirn. Diese Messtechnik wird in einem Projekt gemeinsam mit Neurologen der Universitäten Göttingen, Kiel und Prag zur Bestimmung des neurochemischen Profils bei Patienten mit der seltenen, vererbten Gehirnkrankheit MPAN (mitochondrial membrane protein-associated neurodegeneration) und deren heterozygoten Verwandten eingesetzt, um Aufschlüsse über biochemische Abweichungen gegenüber Gesunden zu gewinnen. Im Mittelpunkt stehen dabei Neurotransmitter, die bei 7 Tesla mit geringer Messunsicherheit bestimmbar sind. (R. Mекle, FB 8.1, ralf.mekle@ptb.de)

### Qualitätssicherung in der Studie IMAGEN

Für die europäische IMAGEN-Studie wurde im Jahr 2012 von der PTB ein Ringvergleich an acht 3-Tesla-MRT-Scannern organisiert und durchgeführt. Die IMAGEN-Studie wird fortgeführt und die ca. 2000 Probanden werden in den kommenden zwei Jahren zum dritten Mal ein umfangreiches MR-Messprogramm absolvieren. Deshalb wird jetzt ein zweiter Ringversuch vorbereitet, in dem zwei PTB-Mitarbeiter mehrere Phantome und sich selbst an allen acht Zentren messen werden. Dies erlaubt dann unter anderem Aussagen zur zeitlichen Stabilität der beteiligten MR-Scanner und führt zu einer Aussage zur Vergleichbarkeit von Messdaten in der Medizin. (R. Brühl, FB 8.1, ruediger.bruehl@ptb.de)

### CMI-Kooperation zum Thema Medizinprodukte

Seit 2008 arbeitet die PTB im Bereich der Augenometrie eng mit dem nationalen Metrologieinstitut CMI der Tschechischen Republik zusammen. Im Frühjahr 2015 besuchte die Führungsspitze des CMI den Fachbereich *Medizinische Messtechnik*, um eine erweiterte Kooperation im Bereich Medizinprodukte zu diskutieren. Ziel ist es, die bestehenden bi-nationalen Projekte sowohl thematisch als auch in Richtung einer europäischen Erweiterung zu vertiefen. (B. Ittermann, FB 8.1, bernd.ittermann@ptb.de)



### **DFG-Verbundvorhaben „PAK 151“ abgeschlossen**

Von 2008 bis 2014 hat die Deutsche Forschungsgemeinschaft einen Forscherverbund von zwei medizinischen und drei physikalisch-technischen Arbeitsgruppen gefördert, der von der PTB koordiniert wurde. Gegenstand der Forschungen waren die physikalischen Mechanismen, die bei der Therapie von Tumorerkrankungen mittels magnetischer Nanopartikel zur Wirkung kommen. Der Abschlussbericht wurde in einem Sonderheft des Fachjournals „Biomedical Engineering – Biomedizinische Technik“ im Oktober 2015 veröffentlicht. Für dieses Themenheft konnten weitere namhafte internationale Wissenschaftler als Autoren gewonnen werden. (L. Trahms, FB 8.2, lutz.trahms@ptb.de)

### **Quantifizierung und Charakterisierung magnetischer Nanopartikel in der Strömung**

Quantifizierung und Charakterisierung magnetischer Nanopartikel (MNP) in strömenden Medien tragen wesentlich zu einem besseren Verständnis der Wirkweise von MNP in biomedizinischen Anwendungen bei. Zu diesem Zweck wurde eine Flusszelle entwickelt, in der die Partikel mittels Magnetpartikelspektroskopie analysiert werden können. Diese besteht aus einer Kapillare, die laminare Strömungsbedingungen gewährleistet und den sensitiven Bereich der Empfängerspule des Spektrometers durch spiralförmige Windungen optimal ausnutzt. Die neue Methode wurde erfolgreich an Referenzproben getestet und bei der Online-Charakterisierung von magnetischen Nanopartikeln nach chromatografischer Trennung eingesetzt. Durch diesen neuen patentierten Kombinationsansatz aus empfindlicher magnetischer Messtechnik und größenselektiver Fraktionierung wird der Zusammenhang von Partikelgröße und magnetischem Verhalten auf schnelle und effektive Weise zugänglich. (N. Löwa, FB 8.2, norbert.loewa@ptb.de)

### **Fluoreszenzmikroskopie an Zellmembranen und Modellmembranen**

Im EMRP-Projekt „Metrology for biomolecular origin of disease“ wurden seit Juni 2012 Wechselwirkungen zwischen Peptiden, kleinen biologischen Molekülen aus bis zu 90 Aminosäuren und Zellmembranen untersucht. In diesem Jahr fand das Projekt seinen Abschluss. Die Arbeitsgruppe 8.31 hat im Rahmen dieses Projektes fluoreszenzmikroskopische Untersuchungen durchgeführt, die von Kollegen der „Advanced Light Microscopy Plattform“ des Max-Delbrück-Zentrums Berlin unterstützt wurden. Dabei wurde gezeigt, dass sich die untersuchten kationischen Peptide an Zellmembranen

anlagern und schließlich in Bindegewebszellen und in Brustkrebszellen eindringen. Die Zellmembran bleibt dabei intakt. Die Moleküle verteilen sich in der Zelle nicht gleichmäßig, sondern häufen sich. Ein Teil dieser Anhäufungen (Cluster) bewegt sich analog zu zelleigenen Vesikeln. Die Peptidkonzentration in den Clustern übersteigt mit der Zeit die Konzentration im umgebenden Medium deutlich. Alle diese Beobachtungen lassen auf einen aktiven Transport der Peptide in die Zelle schließen.

Zur Unterstützung der Biosensor-Entwicklung in der AG *MR-Messtechnik* (8.11) wurden in diesem Kontext außerdem Untersuchungen an Phospholipid-Modellmembranen vorgenommen. (O. Hirsch, FB 8.3, ole.hirsch@ptb.de)

### **Klinische Studie zur Erprobung einer Fluoreszenzkamera für die intraoperative Wächterlymphknotendetektion begonnen**

Eine in der Arbeitsgruppe *Gewebeoptik und Molekulare Bildgebung* entwickelte Fluoreszenzkamera für intraoperative Anwendungen wurde erstmalig an Patienten eingesetzt. Die klinische Erprobung des Systems findet an der Klinik für Gynäkologie des Virchow-Klinikums der Charité Berlin statt. Dabei wird untersucht, inwieweit bei Patientinnen mit verschiedenen Krebserkrankungen die Wächterlymphknoten mithilfe eines Fluoreszenzkontrastmittels identifiziert und sichtbar gemacht werden können. Das während der Krebsoperation in die Nähe des Tumors injizierte Kontrastmittel gelangt innerhalb von wenigen Minuten in die Lymphgefäße und dann weiter in die Lymphknoten. Nach kurzer Wartezeit wird das Gewebe mit den LEDs am Kamerakopf beleuchtet, um die Fluoreszenz des Kontrastmittels anzuregen. Mithilfe der Kamera werden die Fluoreszenzbilder zusammen mit fotografischen Bildern auf einem Bildschirm dargestellt, um dem Operationsteam die Lage der Wächterlymphknoten im Gewebe anzuzeigen. Die Arbeiten sind Bestandteil des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Projektes „FluoroCam“. (D. Grosenick, FB 8.3, dirk.grosenick@ptb.de)

### **Abschluss des EMRP-Projektes INFECT-MET**

Der Nachweis von Krankheitserregern mittels Nukleinsäuretests wird in der klinischen Routine in einem breiten Spektrum angewendet. Dabei kann die Dauer des Tests sowie die Genauigkeit des Testergebnisses erheblichen Einfluss auf die Behandlung einer Infektion haben. Zur Verbesserung messtechnischer Kontrollen im Rahmen der Qualitätssicherung für diese Tests wurden im Rahmen

des EMRP-Projektes INFECT-MET neue Messprozeduren entwickelt und Konzepte zur Validierung erstellt. In der PTB wurden dazu Einflussgrößen, wie z. B. Adsorption von DNA auf Oberflächen oder die Nachweisgrenze für ein qPCR-Gerät (quantitative Polymerase-Kettenreaktion), untersucht. Neben etablierten Methoden wie der qPCR wurde auch eine neue Variante eines für Schnelltests geeigneten isothermalen Amplifikationsverfahrens (LAMP: loop-mediated isothermal amplification) verwendet. Zusätzlich zur Anwendung verschiedener Methoden zur Nukleinsäureamplifikation wurde ein hochempfindliches Durchflussanalyse-System zum direkten Nachweis einzelner Viren und von DNA-Fragmenten entwickelt. Diese direkte Nachweismethode kann potenziell als unabhängige Referenzmethode zur Validierung der Ergebnisse von Nukleinsäureamplifikationstests dienen. (M. Hussels, FB 8.3, martin.hussels@ptb.de; A. Kummrow, FB 8.3, andreas.kummrow@ptb.de)

### **Ermittlung von Brechungsindizes aus Streudaten: Rote Blutzellen**

In der PTB wird die Laser-Durchflusszytometrie zur Charakterisierung von roten Blutzellen eingesetzt. Um die mathematische Modellierung und den Streulicht-basierten Messprozess selbst zu verbessern, ist eine genaue Kenntnis des komplexen Brechungsindex der Zellen in Abhängigkeit der Wellenlänge erforderlich. Um diesen zu ermitteln wurden in der AG 8.32 Extinktionsmessungen an Suspensionen kugelförmiger roter Blutzellen vorgenommen. Zur Auswertung dieser indirekten Messungen werden der zu ermittelnde Brechungsindex sowie weitere Charakteristika (Größenverteilung) der Probe numerisch in einem hoch-dimensionalen nichtlinearen Optimierungsproblem an die Streumessdaten angepasst. (J. Gienger, FB 8.4, jonas.gienger@ptb.de)

### **Hydrodynamische Selektion einer Längenskala in aktiven Fluiden**

In aktiven Fluiden, wie etwa schwimmenden Bakterien, findet man ein turbulenzähnliches Verhalten. Im Gegensatz zur gewöhnlichen Turbulenz, z. B. von Wasser, ist die Dynamik der Schwimmer durch das Auftreten einer bestimmten Wirbelgröße charakterisiert (Längenskala). Durch eine Ableitung von Kontinuumsgleichungen aus mikroskopischen Gleichungen konnte erstmals gezeigt werden, dass die Wirbel und deren Größe durch die Hydrodynamik und der Schwimmerbewegung bestimmt ist. (S. Heidenreich, FB 8.4, sebastian.heidenreich@ptb.de)

### **Diffusionseigenschaften aktiver Teilchen mit Richtungsumkehr**

*Aktive Materie* – Ensembles von Teilchen, die sich selbst-angetrieben fortbewegen – ist ein zentraler Forschungsgegenstand der modernen statistischen Physik. An der PTB wurde ein einfaches Modell zur Beschreibung der Diffusionseigenschaften von aktiven Teilchen, welche periodisch ihre Bewegungsrichtung umkehren, entwickelt. Derartige Bewegungsformen können in einer Vielzahl mikrobiologischer Systeme beobachtet werden. Die theoretische Analyse zeigt auf, dass die Diffusionseigenschaften innerhalb gegebener Parameterbereiche durch einen Resonanzeffekt relevanter Zeit- und Längenskalen optimiert werden können. Die Analyse experimenteller Daten legt die Vermutung nahe, dass sich die „natürlichen Parameter“ mancher mikrobiologischer Systeme in der Tat evolutionär so entwickelt haben, dass diese Mikroorganismen optimal an ihre Umgebung angepasst sind – ein Voraussetzung für eine optimale Nahrungssuche. (R. Großmann, FB 8.41, robert.grossmann@ptb.de)

### **Metaanalyse medizinischer Studien**

Die Metaanalyse der Ergebnisse unterschiedlicher Studien über die Wirksamkeit bestimmter Medikamente oder Therapien spielt in der medizinischen Forschung heutzutage eine große Rolle. Methodisch ist diese Fragestellung eng verwandt mit der Auswertung von Resultaten internationaler Vergleichsmessungen. Die PTB hat dafür ein neues statistisches Verfahren entwickelt, das auch für Metaanalysen in der medizinischen Forschung geeignet ist. Anhand erster Studien konnte gezeigt werden, dass dieses Verfahren Vorteile gegenüber den aktuell in der medizinischen Forschung eingesetzten Methoden hat. (O. Bodnar, FB 8.4, olha.bodnar@ptb.de)

### **Stichprobenverfahren zur Verlängerung der Eichfrist**

Die neue Mess- und Eichverordnung (MessEV) stellt, im Vergleich zu den bisherigen, höhere Anforderungen an die Stichprobenverfahren zur Verlängerung der Eichfrist. In mehreren Treffen hat der Vollversammlungsausschuss „Statistik für MessEV §35“ unter Einbindung der betroffenen Kreise getagt und Vorschläge zur Anpassung erarbeitet. Der PTB-Fachbereich 8.4 wird bis Mitte 2016 einen Vorschlag für das zukünftige statistische Verfahren präsentieren, sodass es, die Zustimmung der zuständigen Länderbehörden vorausgesetzt, ab 2017 angewandt werden kann. (S. Mieke, FB 8.4, stephan.mieke@ptb.de)

## Risikobewertung von Software in Messgeräten

Die Arbeitsgruppe 8.51 *Metrologische Software* hat auf Basis international anerkannter Standards (ISO/IEC 18045, ISO/IEC 15408) ein Verfahren zur Risikoanalyse für Software in Messgeräten entwickelt und damit ein standardisiertes und objektives Verfahren geschaffen, das den Harmonisierungsprozess in Europa unterstützt. Mit diesem Verfahren wurde insbesondere auf den Bedarf der Hersteller nach einem einheitlichen Vorgehen reagiert. Es ist daher bereits in der Anwendung. Das Verfahren wird aktuell auch auf europäischer Ebene abgestimmt.

Mit Inkrafttreten der überarbeiteten europäischen Messgeräte-Richtlinie 2014/32/EU (MID) wird ab dem 20. April 2016 vom Hersteller eines Messgeräts explizit eine Risikoanalyse als Bestandteil der einzureichenden Dokumentation für die Konformitätsbewertung gefordert werden. Für innerstaatlich geregelte Messgeräte ist diese Vorgabe bereits jetzt im §10 MessEV in Verbindung mit §§7 und 8 in nationales Recht umgesetzt worden. Zur Identifikation von Bedrohungen wird hierbei auf die Norm ISO/IEC 15408 (auch „Common Criteria“ genannt) zurückgegriffen. Obgleich die hier beschriebene Vorgehensweise zur Risikoanalyse vorrangig die Software von Messgeräten betrachtet, ist die Prozedur nicht auf diese beschränkt. (M. Esche, FB 8.5, marko.esche@ptb.de)

## Sicheres „Cloud Computing“ im gesetzlichen Messwesen

Das Ziel dieses Projektes ist es, eine Referenzarchitektur für das sichere und vertrauenswürdige Cloud Computing im gesetzlichen Messwesen zu entwickeln. Die Architektur soll als Rahmenwerk dienen, um alle messrechtlich relevanten Funktionen in der Cloud sicher durchzuführen. Dadurch sollen für die Konformitätsbewertungsstelle, die Messgerätehersteller, Messgeräteverwender und die Marktaufsichtsbehörden die Sicherheit und Vertrauenswürdigkeit bei der Umsetzung einer Cloud-basierten-Messgerätelösung garantiert werden. Diese Referenzarchitektur soll im Rahmen von Technologietransferprojekten an die Anforderungen von Herstellern von Messgeräten im gesetzlichen Messwesen angepasst werden. Zusätzlich sollen effektive Prüfverfahren für im Verkehr befindliche Messgeräte Bestandteil der Architektur sein, damit die Akzeptanz der Geräte durch die Marktaufsichtsbehörden im Feld gewährleistet ist.

Die in diesem Projekt bisher erstellten Modelle profitieren von einem modularen Design, bei dem die Forderung der Messgeräte-Richtlinie der Euro-

päischen Union (MID) durch die Anwendung des WELMEC 7.2 Software Guide umgesetzt werden. Das Projekt wird in Kooperation mit der TU Berlin durchgeführt. (A. Oppermann, FB 8.5, alexander.oppermann@ptb.de)

## Sicherheit für eingebettete Systeme im gesetzlichen Messwesen

Eine in der PTB entwickelte neue Software-Referenzarchitektur nutzt die Vorteile der Standard-Betriebssysteme, gewährleistet aber gleichzeitig Sicherheit aufgrund von Kapselung und Modularisierung des Systems. Diese konfigurierbare Software-Referenzarchitektur baut auf einem Mikrokern auf. Dieser Ansatz ermöglicht eine Begrenzung (Kapselung) der Betriebssysteme unter Verwendung sogenannter virtueller Maschinen (VM). Programme und Treiber können nur über den Mikrokern kontrolliert miteinander kommunizieren und auf die Hardware zugreifen. Die Systemarchitektur basiert auf einem modularen Design, bei dem die einzelnen VMs Forderungen der Messgeräte-Richtlinie der Europäischen Union (MID) und des WELMEC 7.2 Software Guides berücksichtigen. So wird eine gesetzeskonforme Architektur gewährleistet, die alle messrechtlich relevanten Funktionen überwachbar und sicher durchführt. Außerdem wird in der Architektur zwischen rechtlich nicht relevanter und rechtlich relevanter Software getrennt. Diese strikte Trennung gewährleistet, dass rechtlich relevante Software nicht beeinflusst werden kann. Auf dieser Architektur wurde ein Demonstrator implementiert, der im Rahmen von Technologietransferprojekten in Produkte überführt werden soll. Das Projekt wird in Kooperation mit der TU Berlin durchgeführt. (D. Peters, FB 8.5, daniel.peters@ptb.de)

## Internationale Angelegenheiten

### Abschluss des EMRP-Projekts „EARS“

Zur Untersuchung der Wahrnehmung von Schall bei sehr hohen und sehr tiefen Frequenzen arbeiteten die Fachbereiche 1.6, 8.2 und 8.1 über drei Jahre intensiv mit anderen europäischen Instituten zusammen. Die Quantifizierung der elektrophysiologischen Aktivierung im auditorischen Kortex mittels Magnetenzephalografie während der Schallexposition war dafür eine wesentliche Voraussetzung. Ein großer Fortschritt wurde dadurch erzielt, dass die Hörschwellen und Lautstärkewahrnehmung als Funktion des Schalldrucks der Probanden mit den im FB 1.6 entwickelten Methoden bestimmt wurden, sodass der Schalldruck während der Magnetenzephalografie-Messung individuell einge-

stellt werden konnte. Bei Frequenzen oberhalb von 18 kHz konnte keine Aktivierung gefunden werden, bei tiefen Frequenzen bis zu 12 Hz scheint der auditorische Kortex aktiviert zu sein. Auf einem Abschlussworkshop mit über 30 Teilnehmern wurden die bisherigen Ergebnisse zusammengefasst, die jetzt noch für Publikationen aufbereitet werden sollen. (T. Sander-Thömmes, FB 8.2, [tilmann.sanderthoemmes@ptb.de](mailto:tilmann.sanderthoemmes@ptb.de))

### **Neue Methode zur Planung von Ringvergleichen**

Internationale Vergleichsmessungen (key comparisons) werden mit dem Ziel durchgeführt, die Äquivalenz der beteiligten Laboratorien zu quantifizieren. Instabilitäten des verwendeten Transferstandards können jedoch zu einer Verringerung der statistischen Aussagekraft von Ringvergleichen führen. Hierfür wurde durch Weiterentwicklung einer im FB 8.4 entwickelten statistischen Analysemethode ein Verfahren erreicht, mit dem sich die Aussagekraft zukünftiger Ringvergleiche, z. B. bei Verwendung mehrerer Transferstandards, bewerten lässt. Die Methodik kann zur Planung internationaler Vergleichsmessungen eingesetzt werden. (G. Wübbeler, FB 8.4, [gerd.wuebbeler@ptb.de](mailto:gerd.wuebbeler@ptb.de); B. Mickan, FB 1.4, [bodo.mickan@ptb.de](mailto:bodo.mickan@ptb.de))

### **EMPIR-Projekt 14SIP08 „Standards und Software zur Maximierung des Nutzens von NMI-Kalibrierungen dynamischer Kraft-, Drehmoment- und Drucksensoren für Endnutzer“**

Das 2014 erfolgreich beendete EMRP-Projekt IND09 „Rückführbare dynamische Messung mechanischer Größen“ hat die Grundlage für die Kalibrierung dynamischer Sensoren an den europäischen Metrologieinstituten gelegt. Zur optimalen Verwendung derartiger Kalibrierergebnisse in industriellen Anwendungen sollen im Rahmen des im Juli 2015 gestarteten EMPIR-Projekts 14SIP08 Anleitungen geschrieben und Software entwickelt werden, welche sich gezielt an die Nutzer von NMI-Kalibrierungen richten. (S. Eichstädt, FB 8.4, [sascha.eichstaedt@ptb.de](mailto:sascha.eichstaedt@ptb.de))

### **BIPM Workshop on Measurement Uncertainty**

2015 wurde am BIPM ein internationaler Workshop über aktuelle Entwicklungen bei der Bestimmung von Messunsicherheiten durchgeführt. Die Veranstaltung mit mehr als 100 Teilnehmern aus über 40 Ländern hat die PTB gemeinsam mit dem BIPM, INRIM (Italien), NPL (Großbritannien) und NIST (USA) organisiert. Neben der Diskussion über die Revision bestehender Richtlinien wurden in einer Reihe von Vorträgen auch herausfordernde, neue Fragestellungen diskutiert, wie z. B. die Ermittlung

von Unsicherheiten bei der Messung dynamischer Größen. Die PTB war insgesamt mit 5 Vorträgen vertreten, darunter 2 eingeladenen Beiträgen. (C. Elster, FB 8.4, [clemens.elster@ptb.de](mailto:clemens.elster@ptb.de))

### **Stellungnahme zum Entwurf der GUM-Revision**

Das Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM) am BIPM hat Ende 2014 eine erste Version für einen revidierten „Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM)“ vorgelegt und die beteiligten internationalen Organisationen sowie die nationalen Metrologieinstitute um Stellungnahme gebeten. Auch die PTB hat den Revisionsentwurf mit allen Abteilungen der PTB diskutiert und Forderungen an eine neue Revision formuliert. (M. Bär, FB 8.4, [markus.baer@ptb.de](mailto:markus.baer@ptb.de))

### **Metrologie für Sensor-Netzwerke zur Charakterisierung elektrischer Netze**

Untersuchungen von Zustandsrekonstruktionsverfahren für elektrische Mittel- und Niederspannungsnetze im Rahmen des 2014 gestarteten EMRP-Projekts ENG63 haben gezeigt, dass für eine zuverlässige Rekonstruktion des Netzzustandes realistische mehrdimensionale stochastische Prozesse zur Modellierung unbekannter Verbrauchswerte notwendig sind. Erste Ergebnisse sind unter Berücksichtigung regenerativer Einspeisung und autoregressiver stochastische Prozesse erarbeitet und veröffentlicht worden. (S. Eichstädt, FB 8.4, [sascha.eichstaedt@ptb.de](mailto:sascha.eichstaedt@ptb.de))

### **Neue mathematische und statistische Methoden für die Unsicherheitsermittlung**

Das EMRP-Projekt „Novel mathematical and statistical approaches to uncertainty evaluation“ wurde im Jahr 2015 erfolgreich abgeschlossen. Die PTB hat dieses Projekt koordiniert und auch in der wissenschaftlichen Forschung maßgeblich begleitet. Als wesentliche Ergebnisse des Projekts sind drei Leitfäden zu den neu entwickelten Verfahren erstellt worden. Darüber hinaus wurde ein virtuelles Zentrum gegründet, das zukünftige Aktivitäten in dem Bereich Mathematik und Statistik für die Metrologie europaweit koordinieren wird. (M. Bär, FB 8.4, [markus.baer@ptb.de](mailto:markus.baer@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

**Prof. Dr.-Ing. habil. Monika Auweter-Kurtz**  
German Aerospace Academy ASA, Stuttgart

**Dr. Norbert Burger**  
Bundesvereinigung der Firmen im Gas- und  
Wasserfach e. V., Köln

**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

**Dr. Matthias Fankhänel**  
BASF SE, Ludwigshafen

**Dr. Hermann Gerlinger**  
Carl Zeiss AG, Oberkochen

**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. Klaus-Peter Jäckel**  
Oberkirch

**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**  
Oerlikon Leybold Vacuum 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

**Prof. Dr. Dr. h. c. mult. Joachim Treusch**  
Bremen

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**

<b>Präsident</b>	<b>Vizepräsident</b>	<b>Mitglied des Präsidiums</b>
Prof. Dr. J. Ullrich ☎ 1000	Dr. R. Schwartz ☎ 2000	Dr. J. Stenger ☎ 3000

Fachbereich PST  
Präsidialer Stab

\*Dr. H. Rabus  
☎ 1009

Presse- und  
Öffentlichkeitsarbeit

Dr. Dr. J. Simon  
☎ 3005

**Abteilung 1**  
**Mechanik und Akustik**

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. F. Riehle  
☎ 4010

**Abteilung 5**  
**Fertigungsmesstechnik**

Dr. H. Bosse  
☎ 5010

Fachbereich 1.1  
Masse

Dr. D. Knopf  
☎ 1100

Fachbereich 2.1  
Gleichstrom und  
Niederfrequenz

Dr. J. Melcher  
☎ 2100

Fachbereich 3.1  
Metrologie in der  
Chemie

\*Dr. B. Güttler  
☎ 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  
Energiesmesstechnik

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  
☎ 3100

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

Prof. Dr. U. Klausmeyer  
☎ 3500

Fachbereich 5.5  
Wissenschaftlicher  
Gerätebau

Prof. 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. U. Johannmeyer  
☎ 3600

Fachbereich 1.7  
Akustik und Dynamik

Prof. T. Bruns  
☎ 1700

Fachbereich 3.7  
Grundlagen des  
Explosionsschutzes

Dr. M. Beyer  
☎ 3700

**Ausschüsse**

QUEST  
Institut an der PTB

Prof. Dr. P. O. Schmidt  
☎ 4700

Personal	A-PE	Prof. 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



# Organigramm

Stand: 1. Dezember 2015

Konformitäts- bewertungsstelle  Dr. R. Schwartz ☎ 2000	<b>Leiter des Instituts Berlin und Vertreter des Präsidenten in Berlin</b>  Dr. G. Ulm ☎ (Ch) 7312	<b>Qualitätsmanager</b>  Dr. K. Stoll-Malke ☎ 8330	<b>Interne Revision</b>  T. Hohlweg ☎ 9012
--	---	---	---

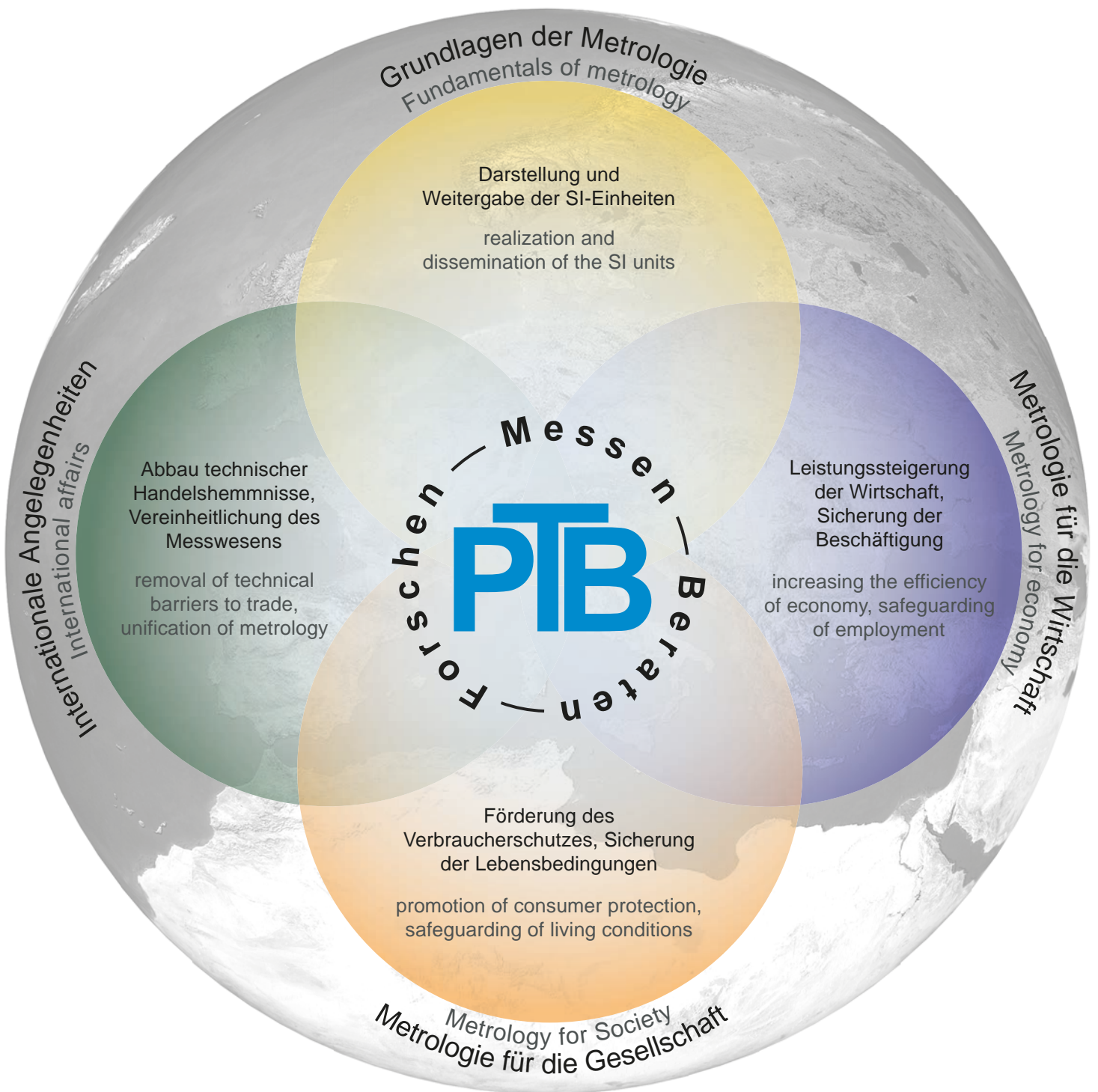
<b>Abteilung 6 Ionisierende Strahlung</b>  Dr. H. Janßen ☎ 6010	<b>Abteilung 7 Temperatur und Synchrotronstrahlung</b>  Dr. G. Ulm ☎ (Ch) 7312	<b>Abteilung 8 Medizinphysik und metrologische Informationstechnik</b> Prof. Dr. T. Schäffer ☎ (Ch) 7343	<b>Abteilung Q Wissenschaftlich- technische Querschnittsaufgaben</b> Dr. P. Ulbig ☎ 8010	<b>Abteilung Z Verwaltungsdienste</b>  C. Tampier ☎ 9010
--	---	--	--	---

<b>Fachbereich 6.1 Radioaktivität</b>  Dr. D. Arnold ☎ 6100	<b>Fachbereich 7.1 Radiometrie mit Synchrotronstrahlung</b>  Prof. Dr. M. Richter ☎ (Ad) 7100	<b>Fachbereich 8.1 Medizinische Messtechnik</b>  Dr. B. Ittermann ☎ (Ch) 7318	<b>Referat Q.11 Wissenschaftliche Bibliotheken</b>  Dr. J. Meier ☎ 8131	<b>Referat Z.11 Haushalt und Beschaffung</b>  M. Wasmuß ☎ 9110
<b>Fachbereich 6.2 Dosimetrie für Strahlentherapie und Röntgendiagnostik</b> Dr. U. Ankerhold ☎ 6200	<b>Fachbereich 7.2 Kryophysik und Spektrometrie</b>  Dr. T. Schurig ☎ (Ch) 7290	<b>Fachbereich 8.2 Biosignale</b>  Dr. L. Trahms ☎ (Ch) 7213	<b>Fachbereich Q.3 Gesetzliches Messwesen und Technologietransfer</b>  Dr. D. Ratschko ☎ 8300	<b>Referat Z.12 Personal</b>  S. Wiemann ☎ 9120
<b>Fachbereich 6.3 Strahlenschutzdosimetrie</b>  *Dr. H. Janßen ☎ 6010	<b>Fachbereich 7.3 Detektorradiometrie und Strahlungsthermometrie</b>  Dr. J. Hollandt ☎ (Ch) 7369	<b>Fachbereich 8.3 Biomedizinische Optik</b>  Prof. Dr. R. Macdonald ☎ (Ch) 7542	<b>Fachbereich Q.4 Informationstechnologie</b>  Dr. S. Hackel ☎ 8400	<b>Referat Z.13 Justizariat</b>  M. Gahrens ☎ 9130
<b>Fachbereich 6.4 Ionen- und Neutronenstrahlung</b>  Dr. F. Wissmann ☎ 6400	<b>Fachbereich 7.4 Temperatur</b>  Dr. J. Fischer ☎ (Ch) 7473	<b>Fachbereich 8.4 Mathematische Modellierung und Datenanalyse</b> Prof. Dr. M. Bär ☎ (Ch) 7687	<b>Fachbereich Q.5 Technische Zusammenarbeit</b>  Dr. M. Stoldt ☎ 8200	<b>Referat Z.14 Organisation und Controlling</b>  Dr. J. Jaspers ☎ 9140
<b>Fachbereich 6.5 Kernphysikalische Anwendungen</b>  *Dr. H. Janßen ☎ 6010	<b>Fachbereich 7.5 Wärme und Vakuum</b>  Dr. T. Lederer ☎ (Ch) 7230	<b>Fachbereich 8.5 Metrologische Informationstechnik</b>  Dr. F. Thiel ☎ (Ch) 7529	<b>Gruppe Q.6 Technische Infrastruktur</b>  *Dr. P. Ulbig ☎ 8010	<b>Referat Z.15 Verwaltung Berlin</b>  A. Lubinus ☎ (Ch) 7449
<b>Fachbereich 6.6 Strahlenwirkung</b>  Dr. H. Rabus ☎ 6600	<b>Fachbereich IB.T Technisch-wissensch. Infrastruktur Berlin</b>  Dr. F. Melchert ☎ (Ch) 7446		<b>Referat Q.61 Arbeitsschutz- und Sicherheitsmanagement</b>  M. Frühauf ☎ 9170	<b>Referat Z.16 Innerer Dienst</b>  A. Grote ☎ 9160
<b>Referat 6.71 Betrieblicher Strahlenschutz</b>  Dr. R. Simmer ☎ 6710			<b>Referat Q.62 Technischer Dienst Braunschweig</b> U. Deventer B. Staab ☎ 9210 / 9213	<b>Referat Z.17 Ausbildung</b>  B. Weihe ☎ 9240
			<b>Referat Q.63 Werkfeuerwehr</b>  B. W. Klose ☎ 9998	<b>Referat Z.18 Betriebliche Fachanwendungen</b> M. Battikh R. Ohl ☎ 3597 / 8430

<b>Gesamtpersonalrat</b>	
S. Brandes	☎ 1098
<b>Örtlicher Personalrat Braunschweig</b>	
W. Krien	☎ 1092
<b>Örtlicher Personalrat Berlin</b>	
R. Thomas	☎ (Ch) 7337
<b>Gleichstellungsbeauftragte</b>	
B. Behrens	☎ 9133
<b>Gesamtvertretung der Schwerbehinderten</b>	
R. Lütge	☎ 1097
<b>Vertretung der Schwerbehinderten Braunschweig</b>	
R. Lütge	☎ 1097
<b>Vertretung der Schwerbehinderten Berlin</b>	
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 Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) – das nationale Metrologie-Institut mit wissenschaftlich-technischen Dienstleistungsaufgaben**

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

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

Der Anteil an Forschung und Entwicklung über alle vier Arbeitsgebiete beträgt rund zwei Drittel aller PTB-Aktivitäten.

### **Grundlagen der Metrologie**

Der Bereich „Grundlagen der Metrologie“ umfasst die in der Satzung verankerten Arbeiten zur Darstellung und Weitergabe der SI-Einheiten und der gesetzlichen Zeit. Hierzu gehören insbesondere die Entwicklung und Bereitstellung von Primärnormalen und Normalmesseinrichtungen und der gegebenenfalls für die Weitergabe der Einheiten benötigten Sekundär- und Transfernormale. Mission ist „die Schaffung des Fundaments für das nationale Messwesen, das den heutigen und für die Zukunft absehbaren Anforderungen genügt“.

Eine besondere Herausforderung stellen die Arbeiten zur Rückführung von SI-Einheiten auf Fundamentalkonstanten dar, wie dies für Sekunde, Meter, Volt und Ohm bereits gelungen ist, da man – zumindest nach unserem heutigen Verständnis der Physik – dann von einer von Ort und Zeit unabhängigen Realisierung der jeweiligen Einheit ausgehen kann. Durch den Beschluss des Comité International des Poids et Mesures (CIPM), vorbereitende Maßnahmen zur Neudefinition der Einheiten Ampere, Kelvin, Kilogramm und Mol auf der Basis von Fundamentalkonstanten einzuleiten, haben diese Arbeiten zusätzlich an Aktualität und Bedeutung gewonnen. Aber auch bei der Darstellung von Einheiten auf der Basis klassischer Prinzipien, z. B. für die dimensionelle Messtechnik, steigen die Anforderungen an die tolerierbaren Unsicherheiten stetig, sodass Technologien verbessert bzw. neuentwickelt und genutzt werden müssen. Zunehmende Bedeutung gewinnt die Rückführung von Messungen in der analytischen und speziell klinischen Chemie auf international anerkannte Normale oder Normalmesseinrichtungen, die für ausgewählte organische und anorganische Analyte in der PTB und ihren Kooperationspartnern (BAM, UBA, DGKL) entwickelt bzw. betrieben werden. Von besonderer gesellschaftlicher Bedeutung ist die Entwicklung von Normalen und Normalmesseinrichtungen für die medizinische Diagnostik und Therapiekontrolle, beispielsweise für die Dosimetrie ionisierender Strahlung, die Ultraschall-Diagnostik oder optische, bioelektrische, biomagnetische und NMR-Diagnoseverfahren.

Ganz offensichtlich ist der Anteil an Forschung und Entwicklung in dem Bereich „Grundlagen der Metrologie“ besonders hoch, weit gespannt und deckt wesentliche Bereiche der modernen Natur- und Ingenieurwissenschaften ab. Die Ergebnisse bilden nicht nur die Voraussetzung für die Entwicklung und Realisierung genauer Normale, sondern liefern

auch – oft in Kooperation mit universitären und außeruniversitären Partnern – wesentliche Erkenntnisse für die Natur- und Ingenieurwissenschaften im Allgemeinen.

### **Metrologie für die Wirtschaft**

Für eine exportorientierte Volkswirtschaft wie die der Bundesrepublik Deutschland ist eine hochentwickelte metrologische Infrastruktur sowie die Verfügbarkeit 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 metrologische Grundlagenforschung dargestellt, sondern durch technische Entwicklungen von Normalen, Normalmessgeräten und erprobten Messverfahren Grundlagen für genaue und zuverlässige Messungen und Prüfungen in Industrie und Handel geschaffen. Die Durchdringung der Produktionsprozesse mit einer Messtechnik, die allen internationalen Ansprüchen gerecht wird, ist eine entscheidende Voraussetzung für zuverlässig funktionierende Qualitätsmanagementsysteme in der Wirtschaft. Dabei ist es unverzichtbar, alle Messergebnisse auf das SI zurückzuführen.

Die Weitergabe der Einheiten wird durch die Akkreditierungen des Deutschen Kalibrierdienstes (DKD; seit 1. 1. 2010 Teil der DAkkS) größtenteils auf die Ebene der industriellen Messtechnik verlagert. Die akkreditierten Kalibrierlaboratorien werden durch die Akkreditierungsstelle kompetent überwacht und in nationalen und internationalen Gremien vertreten.

Wissenschaft und Wirtschaft enger zu verzahnen ist eine politische Forderung, die von der PTB ernst genommen wird. Bei allen Forschungs- und Entwicklungsergebnissen prüft die PTB daher, ob diese auch als Schutzrechte, Patente bzw. Gebrauchsmuster oder durch Know-how-Verträge für eine Vermarktung durch Innovationen in Anspruch genommen werden können. Eine wichtige Rolle im Know-how-Transfer von der PTB in die deutsche Wirtschaft übernehmen Seminare und Fachtagungen, die wissenschaftlich-technische Entwicklungen wichtiger Arbeitsgebiete der PTB zum Thema haben. Speziell auf die Bedürfnisse von kleinen und mittleren Unternehmen (KMUs) ist das Mittelstandsforum der PTB ausgerichtet. Es stellt eine Internet-Plattform dar, welche die Dienstleistungsangebote der PTB

einschließlich der Patentdatenbank in übersichtlicher Form aufzeigt und insbesondere auch Kunden, die mit der Struktur der PTB nicht vertraut sind, Navigationshilfen anbietet, die zu den richtigen Informationen und Ansprechpartnern führen.

### **Metrologie für die Gesellschaft**

In weiten Bereichen des täglichen Lebens besteht ein besonderes öffentliches Interesse an richtigen Messergebnissen und zuverlässigen Messeinrichtungen. Die Metrologie für die Gesellschaft umfasst daher überwiegend Aufgaben, die gesetzlich geregelt sind. In einer Vielzahl von Gesetzen und Verordnungen sind der PTB verschiedene Tätigkeiten zugewiesen; in 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.

Ein Schwerpunkt in diesem Bereich ist die Bauartzulassung bzw. Baumusterprüfung von Messgeräten im Rahmen nationaler oder europäischer Rechtsvorschriften, zum Beispiel auf den Gebieten Energiemesstechnik für elektrische Energie, Gas und Wasser (Wärme, Kälte), Sicherheit im Straßenverkehr (Geschwindigkeitsüberwachung, Atemalkohol), Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) und Umweltmesstechnik (Absolutmessungen in der Schadstoff- und Spurenanalyse, Lärmschutz etc.). Die meisten Bauartzulassungen erfüllt die PTB auf der Grundlage des Eichgesetzes. Bedingt durch die Umsetzung der Europäischen Messgeräte Richtlinie (MID) werden das Eichgesetz und die Eichordnung novelliert. Die PTB ist inzwischen als Benannte Stelle nach europäischem Recht anerkannt, sodass den Kunden aus der Industrie die von der MID geforderten Konformitätsbewertungsverfahren angeboten werden können.

Die PTB ist gemäß Medizinproduktegesetz zuständig für die Sicherstellung der Einheitlichkeit des Messwesens in der Medizin. So entwickelt die PTB neue oder verbessert bereits existierende Messverfahren für Diagnostik und Therapiekontrolle. Zum anderen leistet die PTB entscheidende Beiträge durch Entwicklung von Normalen und Normalmeseinrichtungen, beispielsweise für die Dosimetrie ionisierender Strahlung oder für medizinische

Geräte mit Messfunktion, sowie durch Arbeiten zur Rückführung von analytischen Messungen in der klinischen Chemie auf die SI-Einheiten bzw. Normalmessverfahren.

In Absprache und Kooperation mit der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) ist die PTB auf den wirtschaftlich und vor allem gesellschaftlich wichtigen Gebieten der physikalischen Sicherheitstechnik und des Explosionsschutzes elektrischer Betriebsmittel tätig. Aufgrund ihrer Kompetenz fällt ihr dabei eine internationale Referenzfunktion zu. Gleiches gilt für die Arbeiten auf dem Gebiet des Strahlenschutzes.

### **Internationale Angelegenheiten**

Mit der Gründung der Meterkonvention im Jahre 1875 wurde auf höchster staatlicher Ebene manifestiert, dass Metrologie eine internationale Angelegenheit ist. Durch die zunehmende Globalisierung von Wirtschaft und Handel hat diese Aufgabe in den letzten Jahren erheblich an Bedeutung gewonnen. Im Geschäftsbereich „Internationale Angelegenheiten“ ist es Aufgabe der PTB, „zur internationalen Einheitlichkeit des Messwesens und damit zum Abbau nichttarifärer Handelshemmnisse beizutragen“. Hierzu dienen Kooperationen mit anderen nationalen Metrologieinstituten, maßgebliche Mitarbeit in den internationalen Gremien und technisch-ökonomische Zusammenarbeit mit Entwicklungs- und Schwellenländern.

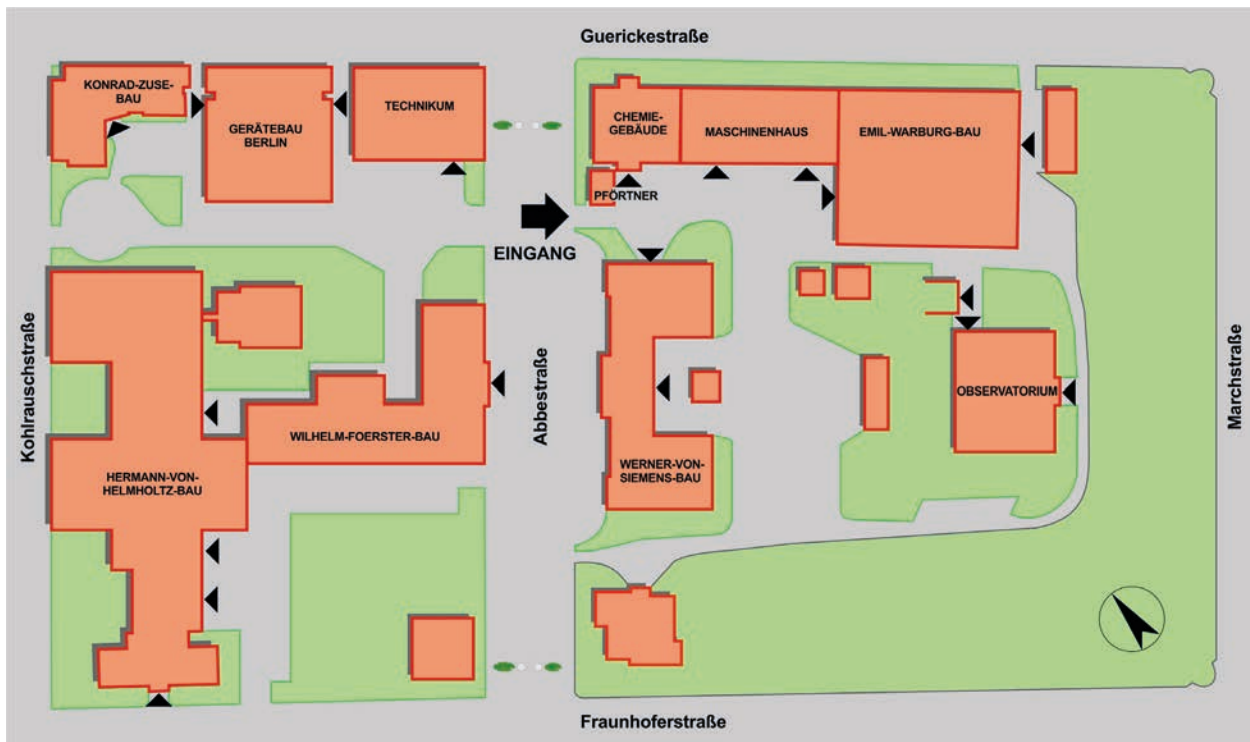
Wesentliches Element der Kooperation mit Partnerinstituten sind internationale „Key Comparisons“ von Normalen und Normalmesseinrichtungen und sich daraus ableitende F&E-Arbeiten. Im Rahmen der internationalen Abkommen zur gegenseitigen Anerkennung von Messergebnissen und Zertifikaten der nationalen Metrologieinstitute und der akkreditierten Prüf- und Kalibrierlaboratorien kommt diesen Vergleichen besondere Bedeutung zu.

Die Anforderungen an die Metrologie werden in Zukunft sowohl vom Umfang als auch von der Komplexität her stetig wachsen, sodass ein einzelnes Institut nicht sämtlichen Ansprüchen auf Dauer genügen kann. Koordination und Kooperation bei F&E und Dienstleistungen sind daher unumgänglich. Die rechtsfähige europäische Metrologieorganisation EURAMET stellt hier die erforderlichen Strukturen zur Durchführung eines europäischen Metrologieforschungsprogramms zur Verfügung.

Neben ihrem europäischen Engagement arbeitet die PTB ebenfalls maßgeblich in allen internationalen Metrologieorganisationen mit, zu einem erheblichen Teil in leitender Funktion. Außerdem leistet die PTB einen wesentlichen Beitrag zur internationalen Normung durch Mitarbeit in Gremien von ISO, IEC, CEN, CENELEC. Die weltweite Angleichung von Anforderungen und Prüfvorschriften im gesetzlichen Messwesen dient dem Abbau nichttarifärer Handelshemmnisse und damit der exportorientierten deutschen Messgeräteindustrie. Mit diesen Zielen arbeitet die PTB aktiv in OIML und WELMEC mit.

Einen erheblichen Umfang nimmt die Technische Zusammenarbeit mit Entwicklungs- und Schwellenländern ein. Die PTB gibt ihre Erfahrungen weiter und leistet aktive Hilfe beim Aufbau der technischen Infrastruktur für die Metrologie sowie für das Normen-, Prüf- und Qualitätswesen einschließlich der Akkreditierung und der Zertifizierung. Die finanziellen Mittel werden überwiegend vom Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (BMZ) sowie weiteren nationalen und internationalen Gebern, wie der EU und der Weltbank, zur Verfügung gestellt.

# Geländeplan Berlin-Charlottenburg



## 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)  
 Kohlrausch-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)

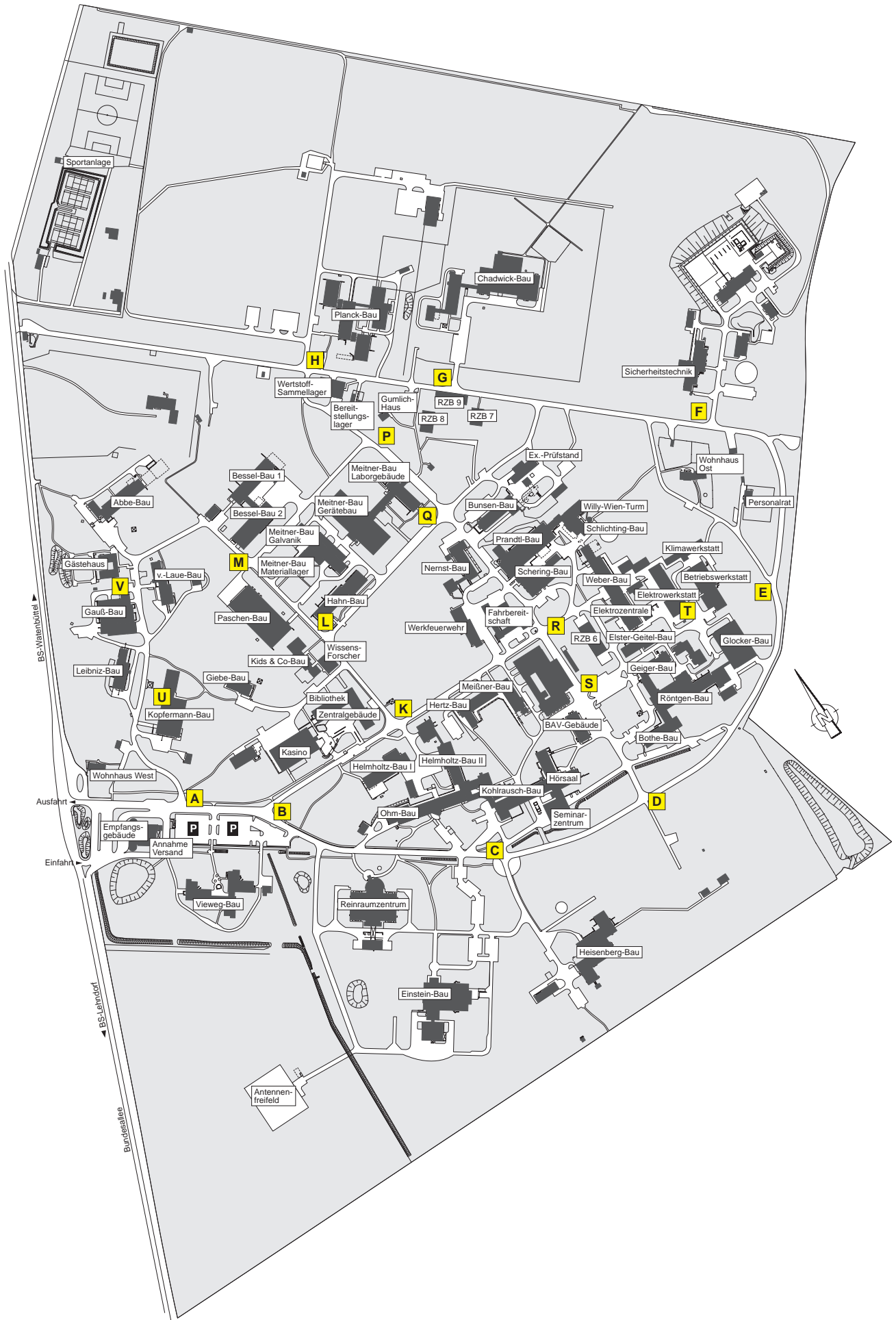
Vieweg-Bau (B)  
 Weber-Bau (R)  
 Werkfeuerwehr (Fire Brigade) (R)  
 Wohnhaus Ost (Residential Building East) (E)  
 Wohnhaus West (Residential Building West) (A)  
 Willy-Wien-Turm (R)  
 Zentralgebäude (Central Building) (K)

### 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)



# Geländeplan Braunschweig





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 2016  
Satz, Gestaltung: PTB, Presse- und Öffentlichkeitsarbeit  
Übersetzung: PTB-Sprachendienst  
Druck: FischerDruck, Peine  
Nachdruck mit Quellenangabe gestattet

**ISSN 0340-4366**