



**Arbeitsprogramm 2009-2011**  
der  
Physikalisch-Technischen Bundesanstalt

18. Mai 2009

Aufgaben.....	3
Auftrag.....	3
Geschäftsbereiche / Tätigkeiten und Ziele.....	3
Themenbereiche.....	8
Themenbereich 1: Akustik, Ultraschall, Beschleunigung.....	9
Themenbereich 2: Durchfluss.....	11
Themenbereich 3: Elektrizität und Magnetismus.....	13
Themenbereich 4: Ionisierende Strahlung.....	16
Themenbereich 5: Länge, dimensionelle Metrologie.....	19
Themenbereich 6: Masse und abgeleitete Größen.....	22
Themenbereich 7: Metrologie in der Chemie, Stoffeigenschaften.....	25
Themenbereich 8: Metrologie für die Medizin.....	28
Themenbereich 9: Radiometrie und Photometrie.....	31
Themenbereich 10: Thermometrie.....	34
Themenbereich 11: Zeit und Frequenz.....	37
Themenbereich 12: Mathematik und Informationstechnik für die Metrologie.....	39
Themenbereich 13: Phys. Sicherheitstechnik, Explosionsschutz.....	41
Anhang.....	43
A1 Mitteleinsatz für Forschung und Entwicklung.....	43
A2 Satzung der PTB.....	44
A3 Liste der gesetzlichen Aufgaben.....	47
A4 Organigramm der PTB.....	58

# Aufgaben

## Auftrag

Für einen modernen Industriestaat ist eine leistungsfähige Infrastruktur für das Messen, Normen, Prüfen und für die Qualitätssicherung eine Grundvoraussetzung. Dafür unterhalten alle Industriestaaten ein nationales Metrologieinstitut. In der Bundesrepublik Deutschland ist dies die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB).

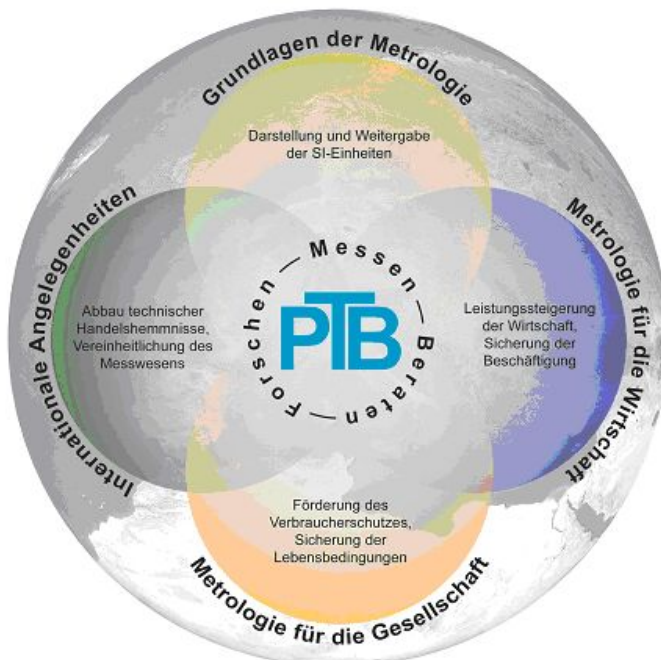
Die PTB wurde bereits 1887 als weltweit erste Einrichtung ihrer Art unter dem Namen Physikalisch-Technische Reichsanstalt auf Initiative von Werner von Siemens und Hermann von Helmholtz gegründet. Sie gehört heute zum Dienstbereich des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie.

Abgeleitet aus der originären Verantwortung des Staates für die Einheitlichkeit des Messwesens liegt der PTB ein Auftrag von Verfassungsrang zugrunde. Der spezifische staatliche Auftrag für die PTB ist es, eine international akzeptierte leistungsfähige messtechnische Infrastruktur für Gesellschaft, Wirtschaft und Handel gleichermaßen bereitzustellen. Dabei geht es auch um das Vertrauen, das jeder, ob Verbraucher, Unternehmer oder Behörde, in die Zuverlässigkeit und Unparteilichkeit von Messungen haben muss. Das konkrete Aufgabenspektrum der PTB ergibt sich aus ihrer Satzung (s. Anhang 1) und insbesondere aus ca. 60 Aufgaben, die der PTB durch Gesetze oder auf solchen beruhenden Verordnungen übertragen sind, davon 50 mit ausschließlicher Zuständigkeit (s. Liste der gesetzlichen Aufgaben der PTB, Anhang 2).

Die PTB erfüllt ihren Auftrag mit dem Anspruch, ein weltweit führendes Kompetenzzentrum für die Metrologie zu sein, als gefragter und geschätzter Partner von Gesellschaft, Wirtschaft und Wissenschaft.

## Geschäftsbereiche / Tätigkeiten und Ziele

Aus ihrer Beauftragung (Mission) leitet die PTB vier ineinander verzahnte Geschäftsbereiche ab:



- **Grundlagen der Metrologie** mit den Zielen der Darstellung und Weitergabe der Einheiten.
- **Metrologie für die Wirtschaft** mit den Zielen der Leistungssteigerung der Wirtschaft und der Sicherung der Beschäftigung.
- **Metrologie für die Gesellschaft** mit den Zielen der Förderung des Verbraucherschutzes und der Sicherung der Lebensbedingungen.
- **Internationale Angelegenheiten** mit den Zielen der Vereinheitlichung des Messwesens und des Abbaus technischer Handelshemmnisse.

Die wesentlichen Tätigkeiten in den Geschäftsbereichen sind:

- **Forschen**
- **Messen**
- **Beraten**

„**Forschen**“ auf dem Gebiet des physikalisch-technischen Messwesens ist ausdrücklich Bestandteil des gesetzlichen Auftrages der PTB (s. insbesondere § 6 des Einheiten- und Zeitgesetzes, EinhZeitG). „Forschen“, oder genauer Forschen und Entwickeln, ist aber ebenso unverzichtbare Voraussetzung für die Darstellung und Weitergabe gesetzlicher Einheiten (s. v. a. § 6 EinhZeitG, § 32 Medizinproduktegesetz). Forschung und Entwicklung dienen dazu, das *gesamte* Aufgabenspektrum mit der erforderlichen Kompetenz ausführen zu können.

Während *Forschung* in der PTB charakterisiert ist durch ein Suchen nach zukünftigen metrologischen Methoden mit offenem Ergebnis, ist *Entwicklung* gekennzeichnet durch eine konkrete Problemlösung auf der Basis vorhandenen Grundlagenwissens vor allem zur Weiterentwicklung der Normale und Messmethoden. In der PTB liegt der Schwerpunkt bei der Entwicklung, und deutlich weniger Anteile liegen bei der Forschung. Mangels Trennschärfe werden jedoch beide Begriffe häufig gemeinsam genannt.

Die Tätigkeit „**Messen**“ steht für die Kalibrierung von Messgeräten, Maßverkörperungen und Referenzmaterialien und Prüfung von Apparaten und Werkstoffen durch Rückführung auf die nationale Normale der PTB. Messen steht aber auch für gesetzlich vorgeschriebene Prüfungen, Zulassungen und Genehmigungen (z. B. auf dem Gebiet des Arbeits- und Umweltschutzes, von Messgeräten nach dem Eichgesetz bzw. MID und dem Gesetz über die elektromagnetische Verträglichkeit, von Produkten nach dem Medizinproduktegesetz, auf dem Gebiet der Sicherheitstechnik und des Strahlenschutzes).

Die Tätigkeit „**Beraten**“ umfasst die Beratung der verschiedenen Zielgruppen im Umfeld der von der PTB zu erbringenden Dienstleistungen, die Mitarbeit der PTB in nationalen, europäischen und internationalen Organisationen und Gremien, die Mitwirkung bei Entwürfen von Gesetzen und anderen Vorschriften, Normen und Richtlinien, die technische Zusammenarbeit mit Entwicklungs- und Schwellenländern zum Aufbau von Metrologiestrukturen und nicht zuletzt die Berichterstattung über die Arbeit der PTB.

Die PTB bearbeitet ihr Aufgabenspektrum in Fachbereichen, die für das jeweilige metrologische Thema tätigkeits- und geschäftsbereichsübergreifend zuständig sind (s. Organigramm, Anhang A3). Dies stellt nicht nur die optimale Nutzung der benötigten operativen und personellen Ressourcen sicher, sondern gewährleistet darüber hinaus vor allem auch einen effizienten Wissenstransfer von der Forschung in die Anwendung und zurück.

Die Anforderungen an die PTB aus Wirtschaft und Gesellschaft müssen sowohl kurzfristig bedient (u.a. Mess-, Kalibrierdienstleistungen, F&E-Kooperationen) als auch langfristig vorbereitet werden (z. B. Sicherung des geforderten technischen Niveaus der Primärnormale und Primär-Messeinrichtungen durch F&E, Kompetenzaufbau). Die PTB wendet verschiedene Prozesse zur Aufgaben- und insbesondere Forschungsplanung und zur Bewertung der Arbeitsergebnisse mit verschiedenen Zeithorizonten an:

- einjährig: Arbeitsplanbesprechungen zwischen Präsidium, Abteilungs- und Fachbereichsleitern,
- ein- bis dreijährig: im Forschungsausschuss der PTB erstelltes Arbeitsprogramm<sup>\*</sup>,
- drei- und mehrjährig: Strategiekonferenzen und die Prozesse zur Erstellung eines koordinierten europäischen Forschungsprogramms der nationalen Metrologieinstitute.

Die Bewertung der Arbeitsergebnisse geschieht hauptsächlich in den jährlichen Arbeitsplanbesprechungen. Gestützt auf Fachvorträge und eine Kosten-Leistungsrechnung, in der Kennzahlen zu Forschungs-, Dienstleistungs- und Beratungsleistungen den jeweils entstandenen Kosten gegenübergestellt sind, findet eine Diskussion innerhalb der Leitungsebene über Bilanz und Ziele statt.

Während Forschungsleistungen an den gängigen Exzellenzkriterien gemessen werden, zählt für die Bewertung von Entwicklungsleistungen, Dienstleistungen und Beratung das Erreichen der jeweiligen technologischen Ziele bzw. dem Nutzen für die Dienstleistungs- und Beratungsnehmer.

Eine wichtige Rückkopplung zur Aufgabenplanung und -bewertung gibt das Kuratorium, das sich jährlich in der PTB trifft.

---

<sup>\*</sup> dieses Dokument

## **Grundlagen der Metrologie**

Der Geschäftsbereich „Grundlagen der Metrologie“ umfasst die gesetzliche Aufgabe der Entwicklung und Bereitstellung der nationalen Normale (i.d.R. Primärnormale) und Normalmesseinrichtungen und der ggf. für die Weitergabe der Einheiten benötigten Sekundär- und Transfer-Normale. Die Mission des Geschäftsbereiches ist die

*„Schaffung des Fundamentes für das nationale Messwesen, das den heutigen und für die Zukunft absehbaren Anforderungen genügt.“*

Einen Schwerpunkt stellen die Arbeiten zur Rückführung von SI-Einheiten auf Fundamentalkonstanten wie Elementarladung  $e$ , Planck-Konstante  $h$ , Avogadrozahl  $N_A$  und Boltzmann-Konstante  $k_B$  dar. Für das Ampere, das Mol und das Kilogramm sowie das Kelvin, die auf diese Konstanten zurückgeführt werden sollen, haben entsprechende Forschungsarbeiten hohe Priorität.

Für Sekunde und Meter sowie für die abgeleiteten Einheiten des praktischen Volt und Ohm ist eine entsprechende Rückführung bereits gelungen. Die Entwicklung und Herstellung von Normalen für die elektrische Spannung auf der Basis von Supraleitern (Josephson-Effekt) und für den elektrischen Widerstand (Quanten-Hall-Effekt) wurden ganz wesentlich durch Arbeiten in der PTB voran gebracht. Für eine Verbesserung der Zeit- und Frequenzdarstellung erforscht die PTB das Potential von optischen Frequenznormalen auf der Basis einzelner Ytterbium und Aluminium-Ionen sowie in optischen Gittern gefangener Strontiumatome, und setzt Femtosekundenlaser zur optischen Frequenzmessung ein.

Mitte 2008 hat der Exzellenzcluster QUEST (Centre for Quantum Engineering and Space-Time Research), an dem neben der PTB und der Universität Hannover das Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik, das Laserzentrum Hannover und das Zentrum für angewandte Raumfahrttechnologie und Mikrogravitation beteiligt sind, die Arbeit aufgenommen. Ergänzt um eine neue Professur und eine Forschergruppe bearbeitet die PTB in diesem Cluster Themen zur Quantenmetrologie auf der Basis ultrakalter Atome und Ionen.

Bei der Darstellung von Einheiten auf der Basis klassischer Prinzipien, z. B. für die Kraftmesstechnik oder die dimensionelle Messtechnik, steigen die Anforderungen an die Unsicherheiten und an die Messbereiche stetig. Messprinzipien und Technologien müssen deshalb verbessert und neu entwickelt werden. Aktuelle Herausforderungen sind hierbei neben der dynamischen Messung mechanischer Größen die Rückführung von Kraftmessungen im Nano-Newton-Bereich und die dimensionelle Nanometrologie. Hierzu werden in der PTB verschiedene, sich teilweise ergänzende Messverfahren entwickelt bzw. weiter entwickelt, wie z. B. Rastersondenmikroskopie, optische Mikroskopie einschließlich der optischen Nahfeldmikroskopie, Elektronenmikroskopie und Interferometrie.

Einzigartig sind die Forschungs- und Messmöglichkeiten der PTB im Bereich der Synchrotronstrahlung durch den Betrieb eines eigenen Elektronensynchrotrons für den THz- bis EUV-Bereich (Willy-Wien-Laboratorium) und den Betrieb eines Laboratoriums bei BESSY II für den kürzerwelligen Bereich.

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 bei ihren Kooperationspartnern (BAM, UBA, DGKL und BVL\*) entwickelt bzw. betrieben werden.

Von besonderer gesellschaftlicher Bedeutung ist die Dosimetrie ionisierender Strahlung, die Entwicklung von Normalen und Normalmesseinrichtungen für die medizinische Diagnostik und Therapiekontrolle, die Ultraschall-Diagnostik oder optische, bioelektrische, biomagnetische und NMR-Diagnoseverfahren.

Eine wesentliche Neuerung ist die europäisch koordinierte Metrologieforschung im Rahmen von EURAMET e.V., die im Abschnitt „Internationale Angelegenheiten“ beschrieben ist.

## **Metrologie für die Wirtschaft**

Für die exportorientierte Volkswirtschaft der Bundesrepublik Deutschland ist eine hoch entwickelte metrologische Infrastruktur sowie die Verfügbarkeit metrologischen Know-hows auf höchstem Niveau zur Unterstützung neuer Technologien eine unabdingbare Voraussetzung.

Die PTB stellt nicht nur die Basiseinheiten dar und entwickelt diese weiter, sondern schafft durch die technische Entwicklung von Normalen, Normalmessgeräten und erprobten Messverfahren messtechnische Systemlösungen

---

\* BAM: Bundeaaanstalt für Materialforschung und -prüfung; UBA: Umweltbundesamt; DGKL: Deutsche Vereinte Gesellschaft für Klinische Chemie und Laboratoriumsmedizin; BVL: Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit

für genaue und zuverlässige Messungen und Prüfungen in Industrie und Handel. Die Durchdringung der Produktionsprozesse mit einer Messtechnik, die allen internationalen Ansprüchen gerecht wird, ist entscheidende Voraussetzung für zuverlässig funktionierende Qualitätsmanagementsysteme in der Wirtschaft. Dafür ist es unverzichtbar, alle Messergebnisse auf das SI zurückzuführen.

Mit den Kalibrierlaboratorien des Deutschen Kalibrierdienstes (DKD), deren Bezugsnormale auf die nationalen Normale der PTB zurückgeführt sind, steht das Instrumentarium dafür bereit. Immer mehr Firmen richten entweder selbst DKD-akkreditierte Laboratorien für die Kalibrierung ihrer Arbeitsnormale ein oder lassen diese von externen DKD-Laboratorien kalibrieren. Es bleibt eine der wichtigsten Aufgaben der PTB, die Zuverlässigkeit des Deutschen Kalibrierdienstes und das internationale Vertrauen in die DKD-Kalibrierscheine auf dem erreichten hohen Niveau zu unterstützen.

Die Mission des Geschäftsbereiches „Metrologie für die Wirtschaft“ kommt in zahlreichen gesetzlichen Aufträgen zum Ausdruck und wird in § 2 Ziffer 4 der Satzung prägnant zusammengefasst:

*„Förderung von Wissenschaft und Wirtschaft durch Forschung und Entwicklung, Kalibrierung, Prüfung und Zulassung, Beratung und Information.“*

Die Arbeitsschwerpunkte der PTB orientieren sich an den Bedürfnissen der für die exportorientierte nationale Wirtschaft wichtigen Branchen und der kleinen und mittleren Unternehmen. Aus dieser Sicht sind folgende Wirtschaftsbereiche und Arbeitsschwerpunkte besonders relevant:

#### **Maschinenbau, Automobil-, Luft- und Raumfahrtindustrie**

Kraft-Normalmesseinrichtung insbesondere für extreme Bereiche, dynamische Messung von mechanischen Größen, Koordinatenmesstechnik, Mikrosystemtechnik

#### **Optische Industrie**

Charakterisierung von optischen Komponenten, insbesondere nichtsphärischer Flächen und Formen, Oberflächenmesstechnik, Radiometrie und optische Messtechnik für den Spektralbereich des FIR bis EUV

#### **Halbleiterindustrie, Elektronik und Kommunikationstechnologie**

Charakterisierung von Reinstsilizium, Mikroanalytik, elektrische Messtechnik bis in den THz-Frequenzbereich, Messtechnik für die optische Kommunikationstechnik, Nanometrologie, Maskentechnik

#### **Chemische und pharmazeutische Industrie**

Rückführung der Messergebnisse in der chemischen Analytik (in Zusammenarbeit mit der BAM)

#### **Medizintechnik**

Entwicklung und Prüfung von Messverfahren und Systemen für Diagnostik und Therapie, Prüfung von Medizinern mit Messfunktion

Im Allgemeinen haben kleine und mittelständische Unternehmen (KMU) nicht in dem Maße Zugang zu neuesten wissenschaftlichen und technischen Entwicklungen wie Großunternehmen. Die PTB sieht es daher als eine ihrer vorrangigen Aufgaben an, KMU durch Informationen, kompetente Beratung und Technologietransfer zu unterstützen und zu fördern.

Die direkte Nutzung der Forschungs- und Entwicklungsleistungen der PTB über die Einheitenweitergabe hinaus wird vom Gesetzgeber als so wichtig erachtet, dass der Wissens- und Technologietransfer als Teil des gesetzlichen Auftrages der PTB in der Neufassung des EinZeitG mit Wirkung vom 11. Juli 2008 festgeschrieben wurde.

Gleichermaßen bedeutsam für die Wirtschaft ist die maßgebliche Mitarbeit der PTB in den nationalen und internationalen Gremien, vor allem denen der Normungsorganisationen. So arbeiten PTB-Mitarbeiter aktuell an ca. 500 Normungsvorhaben mit.

### **Metrologie für die Gesellschaft**

In weiten Bereichen des täglichen Lebens besteht ein besonderes öffentliches Interesse an richtigen Messergebnissen und zuverlässigen Messeinrichtungen. In diesem Geschäftsbereich ist es die Mission der PTB,

*„Messtechnik und -verfahren im Interesse eines lautereren Handelsverkehrs, 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.“*

Einen Schwerpunkt in diesem Bereich bildet die Bauartzulassung bzw. Prüfung von Messgeräten im Rahmen nationaler oder europäischer Rechtsvorschriften (insbesondere Eichgesetz und Europäische Messgeräterichtlinie MID, für die die PTB eine benannte Stelle ist), z. B. auf den Gebieten Wägetechnik, elektrische Energie, Gas und Wasser, Wärmeenergie, Sicherheit im Straßenverkehr (Geschwindigkeitsüberwachung, Atemalkohol), Strahlenschutz, Umweltmesstechnik (Absolutmessungen in der Schadstoff- und Spurenanalyse, Lärmschutz, ...).

In der Politikberatung nimmt das gesetzliche Messwesen den breitesten Raum ein. Hierzu gehört die Beratung von Bundesministerien, vor allem des BMWi, aber auch des BMZ, BMU, BMG, BMI, BMAS, BMELV, BMVBS; in der Regel im Zusammenhang mit speziellen Gesetzen oder Verordnungen, in denen die PTB explizit genannt ist (s. Anhang 2).

Die Gesundheit der Bürger ist ein elementares Bedürfnis der Gesellschaft. Die PTB ist gemäß Medizinprodukte-Gesetz zuständig für die Sicherstellung der Einheitlichkeit des Messwesens in der Medizin. Dies betrifft insbesondere Medizingeräte mit physikalischer Messfunktion. Dazu betreibt die PTB die Entwicklung neuer oder die Verbesserung bereits existierender Messverfahren für Diagnostik und Therapie wie z. B. biomagnetische und bioelektrische Messverfahren, quantitative NMR-Messtechnik und lasergestützte Messverfahren. Die PTB entwickelt weiterhin Normale und Normalmesseinrichtungen für die Dosimetrie ionisierender Strahlung und die Ultraschall-Diagnostik. Sie gewährleistet die Rückführung von analytischen Messungen in der klinischen Chemie auf die SI-Einheiten, insbesondere auf das Mol.

In Absprache und Kooperation mit der 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 der PTB bei der Weiterentwicklung von Explosionsschutz und sicherheitstechnischen Konzepten eine internationale Referenzfunktion zu. Diesen „Wissenspool“ gilt es zu erhalten, mit F&E-Vorhaben auszubauen und verstärkt den Kunden (Bundes- und Länderministerien, Gewerbeaufsicht, Berufsgenossenschaften, Normungsgremien, der Industrie und insbesondere den KMU) zur Verfügung zu stellen. Gleiches gilt für die Arbeiten auf dem Gebiet des Strahlenschutzes und der Strahlenschutzvorsorge.

## **Internationale Angelegenheiten**

Die Meterkonvention von 1875 war der erste internationale Staatsvertrag. Auf höchster Ebene wurde damit manifestiert, dass Metrologie eine internationale Angelegenheit ist. Globalisierung von Wirtschaft und Handel lassen das noch offensichtlicher erkennen. Deshalb ist es die Mission der PTB,

*„zur internationalen Einheitlichkeit des Messwesens und damit zum Abbau nicht tarifärer Handelshemmnisse beizutragen.“*

Hierzu dienen Kooperationen mit anderen nationalen Metrologieinstituten, maßgebliche Mitarbeit in den internationalen Gremien, technisch-ökonomische Zusammenarbeit mit Entwicklungs- und Schwellenländern sowie wissenschaftliche Zusammenarbeit mit anderen Industrienationen.

Das wesentliche Element, um die Einheitlichkeit des internationalen Messwesens global sicherzustellen, ist das *Mutual Recognition Arrangement* des *Comité International des Poids et Mesures* (CIPM-MRA). In diesem Rahmen finden umfangreiche Vergleiche von Normalen und Normal-Messeinrichtungen, die Deklaration von Kalibrier- und Messmöglichkeiten in der Datenbank des BIPM und die gegenseitige Überprüfung der Qualitätsmanagement-Systeme statt.

Die nationalen Metrologieinstitute sind weltweit in regionalen Metrologieorganisationen (RMOs) zusammengeschlossen; in Europa ist dies EURAMET e.V. Dieser in Braunschweig eingetragene Verein gibt den Rahmen zu den Arbeiten zum CIPM-MRA, zu gemeinsamen Projekten und zum *European Metrology Research Programme* EMRP. Das EMRP ist eine Initiative aller Forschung betreibenden europäischen Metrologieinstitute zur Koordinierung der nationalen Metrologie-Forschungsprogramme. 21 gemeinsame dreijährige, durch die Europäische Kommission kofinanzierte Forschungsprojekte mit einem Gesamtvolumen von 63 Mio. Euro sind 2008 angelaufen. Ein noch größeres Programm nach Art. 169 des EU-Vertrages mit einem Gesamtvolumen von 400 Mio. Euro für eine siebenjährige Laufzeit ab 2010 ist in Vorbereitung.

Dem Abbau von Handelshemmnissen und damit der exportorientierten deutschen Messgeräteindustrie dient die weltweite Angleichung von Anforderungen und Prüfvorschriften im gesetzlichen Messwesen. Mit diesen Zielen arbeitet die PTB aktiv in der *Organisation Internationale de Métrologie Légale* (OIML) und der *[Western] European Legal Metrology Cooperation* (WELMEC) mit. Auch die von PTB-Mitarbeitern unterstützten Normungsgremien sind etwa zur Hälfte international (z. B. ISO, IEC, CEN, CENELEC).

## Themenbereiche

Die Einteilung der Tätigkeiten in die Geschäftsbereiche dient hauptsächlich dazu, die Arbeiten der PTB zielgruppen- bzw. kundenorientiert darzustellen. Die PTB hat ergänzend dazu eine komplementäre Einteilung ihrer Tätigkeiten für die interne Arbeitsplanung vorgenommen, die an Fachthemen ausgerichtet ist. Das so entstehende Arbeitsprogramm der PTB umfasst das gesamte Spektrum der PTB, also hoheitliche Aufgaben und Dienstleistungen ebenso wie Forschung und Entwicklung.

Die Gliederung der Themenbereiche orientiert sich am international vereinbarten Schema, wie es sich in den Strukturen der Meterkonvention, d. h. den Comités Consultatives des CIPM, oder in den Technischen Komitees von EURAMET äußert. Mit zwei ergänzenden Fachthemen „Metrologie für die Medizin“ und „Physikalische Sicherheitstechnik und Explosionsschutz“ ist zwei zusätzlichen Arbeitsfeldern der PTB Rechnung getragen, die sich im genannten Schema nicht wiederfinden.

Die Einteilung in Themenbereiche dient dazu, die Schwerpunktsetzung und entsprechende Ressourcenzuteilung fachthemenbezogen durchzuführen und die fachbereichsübergreifende Arbeit zu fördern, ohne dabei die Aufbauorganisation aufzuheben.

Die PTB muss sich zunehmend Herausforderungen stellen, die sich nicht direkt in der Organisationsstruktur oder in den Themenbereichen abbilden. Dazu gehören die Planungen zum EMRP, die sich im Wesentlichen an sogenannten „Grand Challenges“ wie Metrologie für Energie, Umwelt, Gesundheit, Safety & Security ausrichten. Dazu kommen Technologiefelder wie die Terahertz-Metrologie, in denen die PTB Impulse setzen will.

Während Aufbauorganisation und die im Weiteren beschriebenen Themengebiete als mittelfristig stabil zu betrachten sind, bilden die „Grand Challenges“ einen vorübergehenden Bezugsrahmen für die strategisch-fachliche Planung und die Projekte im EMRP. Im EMRP stehen für den Zeitraum 2009/10 konkret die Targetprogramme „Energie“, „Umwelt“ und „Metrologie für die Industrie“ an.

Das EMRP unterscheidet sich maßgeblich von anderen Drittmittelprojekten, nicht nur bezüglich des Volumens, sondern auch konzeptionell. Auf der Basis von „Technology Roadmaps“, die in den Technischen Komitees von EURAMET erarbeitet worden waren, entstand 2006 das EMRP-Dokument, das die fachlichen Ziele des gesamten Programms beschreibt. Ein signifikanter Teil der Forschung und Entwicklung der PTB wird somit im Rahmen des laufenden „iMERA-Plus“-Programms innerhalb des „ERA-NET Plus“-Förderung und der künftigen, deutlich umfangreicheren Artikel-169-Förderung gemeinsam mit den europäischen Partnern geplant und durchgeführt.

Im Folgenden sind pro Themenbereich neben der Beschreibung der Aufgaben, Ziele und geplanten Arbeiten die geplanten Personenjahre\* für „Forschen, Entwickeln“, „Messen“ und „Beraten“ aufgeführt. Aufwendungen für Verwaltungen und interne Dienste sind nicht eingerechnet. Dies ist die in der Einleitung beschriebene und auch in der Kosten-Leistungsrechnung benutzte Einteilung der Tätigkeiten. So werden z. B. Bauartzulassungen, Prüfungen, Kalibrierung unter „Messen“ eingeordnet und Gremienarbeit, Begutachtungen unter „Beraten“.

---

\* Die bei den einzelnen Themenbereichen genannten Personenjahre enthalten anteilig auch den jeweils zugeordneten Personalaufwand des Fachbereiches 5.5 „Wissenschaftlicher Gerätebau“ für Konstruktion, Fertigung und Montage von speziellen Messeinrichtungen sowie von Prüfkörpern und Normalen.

## Themenbereich 1: Akustik, Ultraschall, Beschleunigung

Bearbeitet in den Fachbereichen 1.3 (70%), 1.6, 1.7 (85%)		Forschen, Entwickeln	Messen	Beraten
Personaleinsatz (Personenjahre)	2007	28,8	16,3	7,1
	2008	30,7	14,6	7,6
	2009	32,6	16,1	7,3

### Aufgaben und Ziele

Im Themenbereich *Akustik, Ultraschall und Beschleunigung* werden metrologische Fragestellungen bearbeitet, die die Darstellung und Weitergabe dynamischer mechanischer Einheiten zum Inhalt haben. Ausgehend von Forderungen des Einheiten- und Zeit-, Eich-, Waffen-, Beschuss- und Medizinproduktegesetzes werden vielfältige wissenschaftliche Arbeiten durchgeführt, und es erfolgen zahlreiche gesellschaftlich und wirtschaftlich notwendige Kalibrierungen, Prüfungen und Zulassungen industrienah mit höchster Genauigkeit und Verlässlichkeit. Zur Deckung gegenwärtiger und zukünftiger Anforderungen werden hierzu folgende Aufgaben bearbeitet:

1. Entwicklung von interferometrischen Normalmesseinrichtungen (NME) zur Darstellung und Weitergabe der SI-Einheit für die Beschleunigung (translatorisch und rotatorisch).
2. Entwicklung von Referenzgeräten zur Messung der kinetischen Energie von Einzelpartikeln und außenballistischen Garben im Millimeter-Größenbereich mit Geschwindigkeiten bis 1200 m/s und zur mehrziel- und echtzeitfähigen Messung der Geschwindigkeit von Fahrzeugen.
3. Entwicklung, Bereitstellung und Erweiterung von Verfahren zur Kalibrierung und Prüfung von Mikrofonen, Hydrophonen, Ohrsimulatoren und anderen akustischen und audiologischen Normalen.
4. Entwicklung und Anwendung von Verfahren zur Bestimmung der akustischen Ausgangsparameter von Schall- und Ultraschallquellen aller Art in verschiedenen technischen und medizinischen Anwendungen, Entwicklung einer metrologischen Basis für hochintensive therapeutische Ultraschallfelder.
5. Grundlagenuntersuchungen und Anwendung auf die Messverfahren der angewandten Akustik, insbesondere auf dem Gebiet der Körperschall- und Trittschallmessung.
6. Bauartzulassung von Schallpegelmessgeräten und Schallkalibratoren und damit zusammenhängende Grundlagenuntersuchungen, Akkreditierung und Begutachtung von DKD-Laboratorien.

### Gegenwärtige Situation und geplante Arbeiten

**Zu 1.** Bei der Beschleunigungsmessung soll der Frequenzbereich insbesondere für Vibrometerkalibrierungen auf 50 kHz erweitert werden, um den wachsenden Anforderungen (z. B. aus der MEMS-Messtechnik) gerecht zu werden. Um die weltweit führende Position der PTB auf diesem Gebiet zu halten, werden für ausgewählte Frequenzen neuartige piezoelektrische Schwingererzeuger untersucht. Im Frequenzbereich bis 20 kHz wird nach Methoden zur Verringerung der Messunsicherheit bei der Phasenkalibrierung geforscht, die insbesondere für die Methodik der Parameteridentifikation und für die primäre Rückführung von großer Bedeutung ist. Im Bereich der Stoßkalibrierung von Beschleunigungsaufnehmern soll das Verfahren der Parameteridentifikation in das Standardangebot der PTB integriert werden.

Für die Kalibrierung von elektromechanischen Beschleunigungsaufnehmern mit dynamischen Signalen werden die Verfahren zur Charakterisierung der Prüflinge durch modellbasierte Parameter weiterentwickelt und auf spezifische Erfordernisse der einzelnen Messgrößen und Kalibrierverfahren angepasst.

**Zu 2.** Im Bereich der Verkehrsmessgeräte wurde eine fahrspur selektiv arbeitende Referenzanlage zur Geschwindigkeitsmessung aufgebaut, die sämtliche Fahrzeuge redundant erfasst und somit zur Prüfung innovativer, mehrziel-fähiger Geräte geeignet ist. Auf der Basis dieses Grundkonzeptes entsteht eine weitere Referenzanlage, mit Möglichkeiten zum mobilen Einsatz. Die Referenzanlagen werden in der nächsten Entwicklungsphase mit intelligenten Auswertelgorithmen zur Signalanalyse ausgestattet. Die Entwicklungsarbeiten zum Aufbau eines Moving-Referenzsystems auf der Basis eines Inertial-Navigationssystems werden fortgesetzt und dienen der Bauartzulassungsprüfung von in Kraftfahrzeugen eingebauten Geschwindigkeitsmessgeräten (Videonachfahrssysteme bzw. Moving-Verkehrsradaranlagen). Besondere Bedeutung zum Aufbau des Inertial-Navigationssystems besitzt dabei die laufende Forschungskooperation mit der TU Braunschweig zur Entwicklung von Zertifizierungsverfahren bei sicherheitsrelevanten Systemen mit Satellitennavigationsempfängern.

Zur Messung der Geschwindigkeit und kinetischen Energie von einzelnen Partikeln oder Garben bis ca. 1200 m/s muss für die Ermittlung der Lichtschrankenmessbasis ein neues dynamisches Messverfahren entwickelt werden, das für Vergleichsmessungen mit dieser Referenzanlage in der Qualitätssicherung von Behörden und Industrie benötigt wird.

**Zu 3.** Die hochgenaue Kalibrierung von Mikrofonen bildet die Grundlage für alle akustischen Messungen und auch für die regelmäßige Prüfung von mechanischen Kupplern und Ohrsimulatoren, die zur Qualitätskontrolle von Audiometern eingesetzt werden. Eine Weiterentwicklung und Modernisierung der Kalibrierverfahren soll hier weiterhin für hohe Verlässlichkeit sorgen.

Das Primärnormal des Ultraschalldrucks ist nach einem Totalausfall neu aufzubauen und zu modernisieren. Ziel ist es, im Jahr 2011 erfolgreich am geplanten CCAUV-Ringvergleich teilzunehmen.

Der immer stärkere Einsatz objektiver Audiometriemethoden auf der Basis evozierter Potentiale und oto-akustischer Emissionen (OAE) erfordert die Entwicklung neuer Test- und Kalibrierverfahren, um Diagnosesicherheit und Qualitätssicherung zu ermöglichen. Auf Basis von Hörschwellenbestimmungen und In-Ohr-Verfahren sind neue Kalibriermethoden für neuartige Testsignale zu entwickeln. Kalibrierverfahren für OAE-Geräte sollen aufbauend auf theoretischen Modellen nur mit der Ohrsonde selbst auskommen.

**Zu 4.** Für die Anwendung von Hochleistungsultraschall (High-Intensity Therapeutic Ultrasound - HITU) in der Therapie, z. B. zur lokalen Bekämpfung von Tumoren, ist die Messung und Quantifizierung der verwendeten Schallfelder notwendig. In einem von der Europäischen Union geförderten Projekt (External Beam Cancer Therapy) im Rahmen des EMRP werden die Schallstrahlungskraftmesstechnik und neuentwickelte optische Hydrophone für die Messung von Schallleistung und -druck hochintensiver Felder eingesetzt.

Im Rahmen eines im MNPQ-Programm geförderten Projekts werden neuartige piezoelektrische und thermische Sensoren in Zusammenarbeit mit einem interessierten Unternehmen entwickelt.

Direkte Wirkung auf technische Produktionsprozesse hat die Untersuchung der Ultraschallreinigung. In einem laufenden AiF-geförderten Forschungsprojekt wird geprüft, welche objektiven Parameter für eine Prozesskontrolle und -optimierung eingesetzt werden können.

**Zu 5.** In Deutschland gibt es festgelegte Grenzwerte für die Lärmbelastigung in Gebäuden. Derzeit bestehende Prognose- und daraus abgeleitete Messverfahren sind nicht ausreichend, um die Einhaltung der Grenzwerte bei vertretbarem Aufwand sicherzustellen. Außerdem wird der Aspekt der menschlichen Wahrnehmung ungenügend berücksichtigt. Im Bereich der angewandten Akustik werden daher folgende Aufgabenschwerpunkte bearbeitet:

- Verbesserung der Prognoseverfahren als Grundlage für die verbesserte Definition der Messaufgaben,
- Verbesserung der grundlegenden Messverfahren, insbesondere bei Körperschall- und Trittschallmessungen,
- Bestimmung der Unsicherheit akustischer Kenngrößen,
- messtechnische Kennzeichnung von Körperschallquellen,
- objektivierte Berücksichtigung der menschlichen Schallwahrnehmung,
- Ausbau der Modellmesstechnik als extrem kostensparendes Experimentierverfahren,
- Umsetzung in den Normungsvorhaben bei ISO, CEN und DIN,
- Umsetzung durch Kooperationen mit externen Partnern.

**Zu 6.** Schallpegelmessgeräte sind die wichtigsten Messgeräte zur Messung und Bewertung von „Lärm“. Die PTB ist eine der wenigen Stellen weltweit, die die Bauart von Schallpegelmessgeräten normkonform gemäß der Norm DIN EN 61672-2 (IEC 61672-2) prüfen kann. Für die Durchführung der verschiedenen, sehr umfangreichen Prüfungen sind von der PTB neue automatisierte Messplätze entwickelt und aufgebaut worden. Mit Blick auf das Inkrafttreten der EU-Verordnung Nr. 764/2008 am 13. Mai 2009 ist davon auszugehen, dass eine Schallpegelmess-Bauartzulassung durch die PTB in Europa weiter an Bedeutung gewinnen wird. Zur Zeit werden die IEC-Normen IEC 61672 Teil 1 bis Teil 3 überarbeitet. Die PTB unterstützt diesen Prozess aktiv. Sie wird die verschiedenen Änderungen nach Inkrafttreten der Normen berücksichtigen und dazu die Messplätze entsprechend modifizieren.

## Themenbereich 2: Durchfluss

Bearbeitet in den Fachbereichen * 1.4, 1.5, 7.6 (50%)		Forschen, Entwickeln	Messen	Beraten
Personaleinsatz (Personenjahre)	2007	17,8	19,5	3,7
	2008	19,3	17,2	4,5
	2009	19,3	17,5	5,7

### Aufgaben und Ziele

Der Themenbereich *Durchfluss* befasst sich auf der Basis des Einheitengesetzes mit der Darstellung und Weitergabe der Einheiten für die Strömungsmessgrößen Menge, Durchfluss und thermische Energiemessung von Flüssigkeiten sowie Menge, Durchfluss und Strömungsgeschwindigkeit von Gasen (Nieder- und Hochdruck). Hierzu werden Forschungs- und Entwicklungsarbeiten mit dem Ziel durchgeführt, sowohl den Darstellungsbereich als auch die erreichte Darstellungsunsicherheit an die steigenden Anforderungen von Wissenschaft und Industrie anzupassen.

Aus dem Eichgesetz ergeben sich darüber hinaus vielfältige Aufgaben zur Sicherung der Einheitlichkeit und Richtigkeit der Durchflussmessungen im gesetzlich geregelten Bereich.

Im Einzelnen werden hierzu folgende Themenfelder bearbeitet:

1. Sicherung und Ausbau der internationalen Spitzenstellung bei der Darstellung der Einheiten für die Strömungsmessgrößen von Flüssigkeiten und Gasen, u. a. durch den Einsatz optischer Messmethoden; Erweiterung des Darstellungsbereichs speziell für kleine Flussraten (Mikro- und Nanofluidik).
2. Schaffung geschlossener Systeme der Rückführbarkeit der Gasmessungen und aller Flüssigkeitsmessungen auf die entsprechenden nationalen Normale der PTB.
3. Sicherung der Einheitlichkeit und Richtigkeit aller Mengen-, Durchfluss- und Strömungsgeschwindigkeitsmessungen von Flüssigkeiten und Gasen, auch im Bereich alternativer Energien (z. B. Biokraftstoffe, Biogase, Windenergie), insbesondere für Belange des Verbraucher-, Umwelt- oder Gesundheitsschutzes. Schaffung international einheitlicher Vorschriften für Konformitätsbewertung, Zulassung und Zertifizierung als Voraussetzung für die Anerkennung der entsprechenden Ergebnisse in Europa und weltweit.

### Gegenwärtige Situation und geplante Arbeiten

**Zu 1.** Die PTB verfügt mit den Normalmessenrichtungen für die Mengen- und Durchflussmessung sowie die Strömungsgeschwindigkeitsmessung von Gasen und Flüssigkeiten über ein System von Prüfständen auf sehr hohem, international anerkanntem und durch entsprechende Vergleichsmessungen nachgewiesenem Niveau. Im Flüssigkeitsbereich liegt der Arbeitsschwerpunkt auf dem weiteren Ausbau des Hydrodynamischen Prüffeldes (HDP) zum europäischen Kompetenzzentrum im Rahmen von EURAMET und EMRP. Das Ziel liegt dabei in der langfristigen Sicherstellung der erreichten, sehr geringen Messunsicherheit von 0,02 % für Durchflüsse bis 2100 m<sup>3</sup>/h und der Erweiterung auf die Messung veränderlicher Durchflüsse sowie letztendlich die Darstellung des Momentandurchflusses. Für die Rückführung von Messgeräten, die in Extrembereichen (z. B. in Kraftwerken) eingesetzt werden, investiert die PTB in eine neue Normalmessenrichtung, um die Skale für Durchflüsse bis 180 m<sup>3</sup>/h und Temperaturen bis 230 °C darstellen zu können. Diese Normalmessenanlage wird im Zusammenspiel mit den einzigartigen Messmöglichkeiten der PTB, z. B. dem HDP, erlauben, die Messtechnik in Kraftwerken so zu verbessern, dass Steigerungen des Wirkungsgrades in Kraftwerken im Prozentbereich zu erwarten sind.

Im Gassektor soll insbesondere durch die Modernisierung der PTB-Normalmessenrichtungen für die Hochdruck-Erdgasmessung auf dem Prüfstand *pigsar* der E.ON Ruhrgas AG die führende Stellung Deutschlands weiter ausgebaut werden. Einen wichtigen Beitrag wird hierbei das zur Zeit in der Inbetriebnahme befindliche optische Durchflussnormal leisten. Im Zusammenspiel mit dem volumetrischen Normal (Rohrprüfstrecke) wird hiermit für die Weitergabe der Volumeneinheiten für HD-Erdgas eine Verringerung der Messunsicherheit auf 0,1 % erwartet. Diese Verbesserung wird sich auf anstehende CIPM-Schlüsselvergleiche und auf die Definition des Harmonisierten Europäischen Erdgaskubikmeters positiv auswirken.

\* In geringem Umfang wird das Themengebiet auch in den Fachbereichen 3.3 und 3.4 behandelt.

Folgende vordringliche Aufgaben und Herausforderungen werden auf dem Gebiet der Mengen- und Durchflussmessung strömender Gase und Flüssigkeiten gesehen und sind in enger Abstimmung zwischen den betroffenen Fachbereichen der PTB und den europäischen Partnern zu lösen (siehe EURAMET TC Flow roadmap „Future of metrology in the Fluid Flow“ area):

- Verringerung der Messunsicherheiten der gesamten Rückführungskette bis zum Verwender, d. h. bis zum praktischen Einsatz von Gas- und Flüssigkeitsmessgeräten vor Ort (unter Berücksichtigung des Einflusses von Temperatur, Druck, Gas-/Flüssigkeitsart, Strömungsprofil),
- Erarbeitung von Prüfverfahren für neuartige Gas- und Flüssigkeitsmessgeräte (wie thermische Massebestimmer, Coriolismesser, Ultraschallanemometer) sowie für neue bzw. alternative Brennstoffe (z.B. Biokraftstoffe, Flüssigerdgas, langfristig auch Flüssigwasserstoff),
- Darstellung und Weitergabe von Mikrodurchflüssen z. B. für die Medizintechnik und die Erzeugung von Gas- und Flüssigkeitsgemischen, mit dem Ziel der dynamischen Untersuchung und Kalibrierung von Gasanalyse- und Flüssigkeitsmess-Systemen in Chemie, Umwelt und Biologie.

**Zu 2.** Im Bereich der Gasmessung existieren geschlossene Rückführungsketten für die Messgrößen Menge und Durchfluss. Wegen der ständig wachsenden Anforderungen aus Industrie und Wissenschaft sowie des Zieles, die Messung vor Ort/beim Endverbraucher zu verbessern, ist eine stetige Weiterentwicklung der Primär- und der Sekundärnormale sowie die Erweiterung der Prüf- und Messmöglichkeiten erforderlich. Hierzu werden die Prüfmöglichkeiten für Gasmessgeräte mit Luft auf Prüfdrücke bis 16 bar bei maximalen Masseströmen bis ca. 2000 kg/h erweitert sowie die Überführung eines neuentwickelten Glockenkolben-Normalgerätes (40 - 4000 l/h) in das Leistungsangebot der PTB angestrebt.

Im Flüssigkeitsbereich steht die Entwicklung von messstabilen, medienunabhängigen TransfERNormalen mit Reproduzierbarkeiten deutlich kleiner als  $1 \cdot 10^{-4}$  im Vordergrund. Ziel ist es, mit Hilfe dieser TransfERNormale eine geschlossene Rückführungskette für alle Flüssigkeitsmessungen auf das Hydrodynamische Prüffeld aufzubauen und dieses Prüffeld als nationales Normal zu etablieren, nicht nur für das Messgut Wasser, sondern für alle wirtschaftlich relevanten Flüssigkeiten, wie z. B. Mineralöl, flüssige Nahrungsgüter und chemische Produkte bis hin zu kryogenen Flüssigkeiten. In diesem Zusammenhang steht insbesondere die Modernisierung des Mineralölmessprüfstandes im Vordergrund, dessen Messmöglichkeiten durch den Einsatz eines automatischen Höhenmesssystems an den volumetrischen Normalen und durch die Realisierung des Pumpendirektbetriebes deutlich erweitert wurden. Im Ergebnis dieser Arbeiten wird ein messtechnisch relevanter Überlappungsbereich mit dem Hydrodynamischen Prüffeld geschaffen, in dem die notwendigen wissenschaftlichen und experimentellen Untersuchungen mit unterschiedlichen Messgütern auf dem erforderlichen Niveau hinsichtlich Genauigkeit, Parameterstabilität und Messwerterfassung durchgeführt werden können.

**Zu 3.** Die PTB ist beim Arbeitsgebiet Durchfluss von Gasen und Flüssigkeiten im Rahmen des Eichgesetzes Dienstleister für eine Vielzahl deutscher Unternehmen, die z. B. sowohl bei Gaszählern als auch bei Wasser- und Wärmezählern ca. 70 % bis 80 % des europäischen Marktes und ca. 45 % des Weltmarktes abdecken. Als nationales Kompetenzzentrum soll sie auch zukünftig sowohl den deutschen Messgeräteherstellern in Fragen der Konformitätsbewertung und Zertifizierung wie auch den Eichbehörden im Rahmen der Marktüberwachung zur Seite stehen. Im Rahmen von Forschungsprojekten werden so zur Zeit beispielsweise gemeinsam mit der Wasser- und Wärmezählerindustrie zahlreiche konkrete Aufgaben zur Messkapselproblematik, zum intermittierenden Betrieb von Wasserzählern und zum Einfluss der jeweiligen Betriebs- und Installationsbedingungen der Zähler auf deren messtechnisches Verhalten bearbeitet. Ebenso werden gemeinsam mit dem FB 3.3 die neu zu bestimmenden messtechnischen Anforderungen im Zusammenhang mit dem steigenden Einsatz von Biokraftstoffen verifiziert.

Um die Einhaltung der MID-Anforderungen an Gaszähler bei Konformitätsbewertungen untersuchen zu können, wurde ein Durchflussprüfstand für Zähler mit einem Gas- und Umgebungstemperaturbereich von  $-40\text{ °C}$  bis  $+80\text{ °C}$  aufgebaut, der noch um eine rechnerbasierte Ansteuerung und Messwerterfassung für den täglichen Prüfbetrieb zu erweitern ist. Im Hinblick auf die Beurteilung der Wirtschaftlichkeit neuer Windenergieanlagen ist ein zunehmender Bedarf an rückgeführten Windgeschwindigkeitsmessungen mit reduzierter Messunsicherheit entstanden. Hierfür wurde im Gasbereich ein neuer Windkanal für Luftgeschwindigkeiten von 0,5 m/s bis 60 m/s aufgebaut, der in das Leistungsangebot der PTB zu überführen ist.

Die aktive Mitarbeit in 12 nationalen und mehr als 25 internationalen Vorschriften- und Normungsgremien auf dem Gebiet der Flüssigkeits- und Gasmessung erfolgt schwerpunktmäßig im Bereich des gesetzlichen Messwesens. Hauptaufgaben sind hierbei insbesondere die internationale Vereinheitlichung der Anforderungen an die entsprechenden Messgeräte und -anlagen sowie die nationale Umsetzung dieser internationalen Vorschriften als Voraussetzung für die internationale Anerkennung von Prüfergebnissen, Zulassungen und Zertifikaten.

## Themenbereich 3: *Elektrizität und Magnetismus*

Bearbeitet in den Fachbereichen 2.1 – 2.6, PSt (25%)		Forschen, Entwickeln	Messen	Beraten
Personaleinsatz (Personenjahre)	2007	95,5	25,8	7,8
	2008	97,3	26,4	8,0
	2009	104,6	25,6	7,7

### **Aufgaben und Ziele**

Der Themenbereich *Elektrizität und Magnetismus* befasst sich gemäß dem aus dem Einheiten- und Zeitgesetz, dem Eich- und EMV-Gesetz sowie aus der Europäischen Messgeräte-Richtlinie (MID) 2004/22/EG abgeleiteten Auftrag mit der Darstellung, Bewahrung und Weitergabe elektrischer und magnetischer Einheiten. Hierzu werden Forschungs- und Entwicklungsarbeiten mit dem Ziel durchgeführt, den derzeitigen und zukünftigen Bedarf von Industrie und Wissenschaft an genauen Kalibrierungen elektromagnetischer Größen in sich erweiternden Wertebereichen zu decken. Die Arbeiten sind eingebunden in die EMRP Targetprogramme „Electricity and Magnetism“ sowie „Fundamentals of the SI“. Im einzelnen werden folgende Aufgaben bearbeitet:

1. Aufbau von Skalen für elektrische und magnetische Messgrößen über einen weiten Werte- und Frequenzbereich unter möglichst direkter Nutzung von Quanteneffekten. Neu- und Weiterentwicklung von Quantenspannungsnormalen und Quantenwiderstandsnormalen, einschließlich der Entwicklung von Fertigungsverfahren zur Herstellung der dazu erforderlichen Quantenschaltungen.
2. Validierung der Grundlagen der elektrischen Quantenmetrologie. Nachweis der Konsistenz des quantenmetrologischen Dreiecks aus Spannung (Josephson-Effekt), Ladung (Einzelladungstransport) und Kapazität (abgeleitet vom Quanten-Hall-Effekt). Entwicklung von Quantenstromnormalen.
3. Theoretische und experimentelle Untersuchungen zur Universalität des Quanten-Hall-Effekts am Beispiel von Graphen. Charakterisierung von Quantenzuständen supraleitender elektronischer Schaltungen, Untersuchung der Kohärenzeigenschaften, Entwicklung zerstörungsfreier Messverfahren.
4. Entwicklung von Messmethoden für den Nanomagnetismus. Messung magnetischer Größen mit höchster Zeit- und Ortsauflösung unter Einsatz der Rastersondenmikroskopie, Zeitbereichsmessverfahren und Hochfrequenzmesstechnik.
5. Wechsel/Gleich-Transfer zur Anbindung der Wechselstrommesstechnik an die Gleichstrommesstechnik; Ausbau der elektrischen Energiemesstechnik.
6. Ausbau der Hochfrequenz-Messtechnik bis 110 GHz. Aufbau einer Freifeldmessanlage für Antennenmessungen und Emissionsmessungen im Bereich der EMV. Rückführbare Messung der spezifischen Absorptionsrate.

Im Rahmen der Arbeitsplanbesprechungen sind die Aufgaben Quantenmetrologisches Dreieck einschließlich der Einheitendarstellung mittels Quanteneffekte und der Nanomagnetismus als Bereiche mit Ausbaupotential bestimmt worden.

### **Gegenwärtige Situation und geplante Arbeiten**

**Zu 1.** Die Skalen für die Messgrößen Spannung, Stromstärke, Widerstand, Kapazität, Induktivität usw. basieren derzeit noch überwiegend auf klassischen Methoden zur Darstellung elektrischer Einheiten. Mittelfristig sollen die Einheiten von Spannung, Widerstand und Stromstärke mit Hilfe von Quantennormalen auf Fundamentalkonstanten zurückgeführt werden.

Für die bereits über Quanteneffekte dargestellte Messgröße Spannung wird im Bereich technischer Frequenzen die Entwicklung binär gestufter Josephson-Reihenschaltungen für die Erzeugung beliebiger Kurvenformen mit höchster Genauigkeit vorangetrieben. Zur Erzeugung von Wechselspannungen höherer Frequenz werden pulsgetriebene Josephson-Reihenschaltungen entwickelt. Daneben werden neue Kontakttypen untersucht und das Design sowie die Technologie von Josephson-Reihenschaltungen optimiert. Bei den Entwicklungsarbeiten zur Weitergabe der Messgröße Spannung stehen mittlerweile Wechselstromanwendungen von binär gestuften Josephson-Reihenschaltungen im Vordergrund. Diese erlauben es, thermoelektrische Verfahren für den AC/DC-Transfer, digitale Abtastverfahren und Datenwandler hinsichtlich ihrer Genauigkeit zu überprüfen.

Die Realisierung der Gleichstrom-Widerstandsskala soll zukünftig auf der Grundlage des Quanten-Hall-Effekts (QHE) erfolgen. Mit Reihen- und Parallelschaltungen quantisierter Hallwiderstände ist es möglich, Widerstandswerte in dem für die Metrologie besonders wichtigen Bereich von  $100 \Omega$  bis zu  $1 \text{ M}\Omega$  zu realisieren. Dazu wurde eine vertikale Parallelschaltung aus zwei quantisierten Widerständen entwickelt. Zur Zeit werden die Fertigungsverfahren für komplexere integrierte Schaltungen quantisierter Widerstände optimiert.

Der Wechselstrom-QHE (AC-QHE) bildet ein wichtiges Bindeglied zwischen der Widerstands- und der Kapazitätseinheit und bindet damit die Impedanzmesstechnik an die Gleichstrommesstechnik an. Durch spezielle Beschaltungsmaßnahmen konnten hochpräzise AC-QHE Widerstände mit im kHz-Bereich vernachlässigbarer Frequenzabhängigkeit realisiert werden. In Zukunft soll der AC-QHE genutzt werden, um die Messbrücken und Transferketten der Impedanzmesstechnik zu vereinfachen.

**Zu 2.** Ziel der Arbeiten ist die Absicherung der metrologischen Grundlagen eines zukünftigen, auf Fundamentalkonstanten bezogenen Einheitensystems. Dazu soll die Konsistenz des Josephson-Effekts, des QHE und des Einzelladungstransports durch Vergleich von Spannungs-, Ladungs- und Kapazitätswerten (abgeleitet vom QHE) mit einer Unsicherheit von zunächst  $1 \cdot 10^{-7}$  und längerfristig  $1 \cdot 10^{-8}$  experimentell nachgewiesen werden. Zur Realisierung definierter Ladungsmengen werden normalleitende Einzelelektronen-Schaltungen weiterentwickelt (sog. R-Pumpen mit Betriebsfrequenzen im MHz-Bereich). Quantennormale für Stromstärken im nA-Bereich erlauben direkte Konsistenztests der o. g. Quanteneffekte durch Vergleich der Größen Spannung, Widerstand und Stromstärke. In diesen Quantenschaltungen muss die Manipulation einzelner Elementarladungen bei höheren Betriebsfrequenzen erfolgen. Hierzu werden hybride Supraleiter-Normalleiter-Schaltungen sowie Halbleiter-Einzelelektronenpumpen untersucht. Weitere Arbeiten werden sich auf die Parallelisierung von Einzelelektronen-Schaltungen zur weiteren Erhöhung der Stromstärke konzentrieren.

**Zu 3.** Universalitätstests des Quanten-Hall-Effekts behandeln die Frage, wie exakt der Hallwiderstand durch den Quotienten von Planckscher Konstante  $h$  und dem Quadrat der Elementarladung  $e$  gegeben ist, und dienen der weiteren Absicherung eines auf Fundamentalkonstanten basierenden Einheitensystems. Derzeit konzentrieren sich die Untersuchungen auf Graphen, dessen elektronische Eigenschaften sich grundlegend von denen der bisher für QHE-Anwendungen benutzten Materialien unterscheiden. Mit Hilfe numerischer Modellrechnungen wird der Einfluss von Unordnung, äußeren Magnetfeldern und der Probengeometrie auf den elektrischen Transport untersucht. Diese theoretischen Untersuchungen werden von elektrischen Präzisionsmessungen begleitet. Weiterhin werden supraleitende Quantenschaltungen für die zukünftige Nutzung von Quanteneffekten in der elektrischen Metrologie entwickelt und untersucht. Zur gezielten Manipulation von Quantenzuständen in diesen Schaltungen müssen die Zustände lange Kohärenzzeiten aufweisen. Daher soll für verschiedene Typen supraleitender Schaltungen die Quantenkohärenz durch den Einsatz fortschrittlicher Herstellungsverfahren, geeigneter Materialien und optimierter Designs verbessert werden. Weiterhin werden die erforderlichen Technologien und Messverfahren entwickelt, um Quantenzustände in supraleitenden elektrischen Schaltungen zerstörungsfrei zu messen.

**Zu 4.** Die gezielte Entwicklung nanomagnetischer Bauelemente erfordert Analysemethoden mit Ortsauflösung im Nanometerbereich und Pikosekundenzeitauflösung. Deshalb soll eine Methode zur quantitativen Messung der magnetischen Flussdichte mit einer Ortsauflösung  $< 100 \text{ nm}$  entwickelt werden – basierend auf der Magnetkraftmikroskopie und Referenzmaterialien, die mit magneto-optischen Verfahren rückführbar vermessen werden. Zur zeitaufgelösten Messung von Ummagnetisierungsprozessen wurden verschiedene Magnetowiderstandsmessverfahren und induktive Verfahren realisiert, ergänzt von Methoden der Vektornetzwerkanalysator-gestützten magnetischen Resonanzspektroskopie. Die laufenden Arbeiten haben die Rückführung dieser Messmethoden zum Ziel.

**Zu 5.** Die geplanten Entwicklungen beim Wechsel/Gleich-Transfer konzentrieren sich auf die Ausweitung des Frequenzbereichs zu hohen (planare Thermokonverter auf Quarzsubstrat) und niedrigen Frequenzen (digitale Abtastverfahren) sowie auf kleine Spannungen bis herab in den  $\mu\text{V}$ -Bereich (Mikropotentiometer).

Das seinerzeit für die Entwicklung eines hochgenauen Primärnormals für die elektrische Leistung eingesetzte digitale Abtastverfahren wird auch in anderen Bereichen zur Messung elektrischer (Phasenwinkel, Verlustfaktor, Übersetzungsverhältnis unkonventioneller Messwandler) sowie nichtelektrischer Größen (Messung von Kraft, Drehmoment, Beschleunigung und Schalldruck) eingesetzt. Theoretische Untersuchungen und Vergleichsmessungen gegen Quantennormale sollen die kleinste erzielbare Unsicherheit der Abtastverfahren ermitteln.

Der Bedarf an Messtechnik für die Erfassung von Netzstörungen und Netzurückwirkungen entwickelt sich weiter dynamisch, weil der Oberschwingungsgehalt auf den Netzen auf Grund nichtlinearer Verbraucher zunimmt und die Versorgungsqualität infolge rückläufiger Investitionen in die Netze nachlässt. Daher sollen die existierenden Verfahren zur numerischen Signalanalyse, zur Messung transientser Ströme und Spannungen sowie periodischer, aber nicht sinusförmiger Signale weiterentwickelt und Kalibriermöglichkeiten für Messgeräte und ggf. auch Normale für Netzqualitätskenngrößen angeboten werden. Im Bereich der Endenergieeffizienz und Energiedienstleistungen beteiligt sich die PTB an der wissenschaftlichen Erforschung des Potenzials der Metrologie zur Errei-

chung der EU-Energieeinsparziele. Es wird angestrebt, diese Aktivitäten in zukünftige EMRP Programme einzubringen. Des Weiteren unterstützt die PTB mit Forschung und Beratung die von der Europäischen Kommission initiierte Vereinheitlichung der Bahnstrom-Abrechnungsmesstechnik in Europa.

**Zu 6.** Zum Ausbau der Hochfrequenzmesstechnik bis zu 110 GHz wird schrittweise eine rückführbare Feld-, Antennen-, S-Parameter-, Impedanz-, Dämpfungs- und Leistungsmesstechnik entwickelt. Die Messmöglichkeiten der vektoriiellen Netzwerkanalyse wurden bereits erweitert. Für die Rückführung von On-Wafer-Messungen werden Kalibriersubstrate und Messverfahren basierend auf berechenbaren Leitungssystemen für Frequenzen bis 110 GHz entwickelt und die dielektrischen Eigenschaften von Materialien untersucht. Für die Messung und Charakterisierung elektromagnetischer Felder wurde eine in Europa einmalige Referenz-Freifeldmessanlage für Antennenmessungen bis in den unteren GHz-Bereich sowie für EMV-Emissionsmessungen aufgebaut und nahezu fertig gestellt. Für höhere Frequenzen wurde mit dem Neuausbau und der Modernisierung einer echofreien Halle und den Planungen für einen Antennenscanner begonnen. Zur Rückführung der Messungen der spezifischen Absorptionsrate wird eine Normalmesseinrichtung aufgebaut.

## **Unterthema Terahertz-Metrologie**

Bearbeitet in den Fachbereichen 2.2 (15 %), 2.5 (10 %), 7.2 (5 %), 7.3 (10 %), 7.5 (5 %)

### **Aufgaben und Ziele**

1. Ausbau der strahler- und detektorgestützten THz-Radiometrie, Entwicklung supraleitender Strahlungsdetektoren mit SQUID-Auslese, Optimierung und erste Nutzung des Elektronenspeicherrings Metrology Light Source (MLS) als THz-Strahlungsquelle, Ausbau der elektrischen Hochfrequenz-Messtechnik bis 0,3 THz, Weiterentwicklung optoelektronischer Messmethoden für den THz-Bereich.

### **Gegenwärtige Situation und geplante Arbeiten**

**Zu 1.** Zur Rückführung der THz-Spektroskopie muss die spektrale Empfindlichkeit von THz-Strahlungsempfängern ermittelt werden. Quellengestützt wurde die Empfindlichkeit bezüglich der Bestrahlungsstärke auf der Grundlage berechenbarer Schwarzkörperstrahlung bei verschiedenen Frequenzen von 4,82 THz bis 0,22 THz bestimmt. Detektorgestützt wurde die Empfindlichkeit bezüglich Strahlungsleistung mit einem Kryoradiometer und einem Quantenkaskadenlaser bei 2,5 THz bestimmt. Beide Messmethoden werden weiterentwickelt. Als Detektoren für die THz-Spektroskopie sollen supraleitende Phasenübergangs-Bolometer mit SQUID-Ausleseelektronik entwickelt werden.

Die MLS ging in 2007 erfolgreich in Betrieb und der Aufbau eines dedizierten THz-Strahlrohrs wurde im Dezember 2008 abgeschlossen. Die zukünftigen Arbeiten umfassen die Optimierung des MLS-Sonderbetriebs zur Erzeugung von THz-Strahlung, den Aufbau eines IR- und THz-Messplatzes sowie erste Experimente zur THz-Spektroskopie und -Streuung.

In der elektrischen Hochfrequenz-Messtechnik soll die Leistungs-, Antennen-, Feldstärke- und S-Parameter-Messtechnik bis 0,3 THz ausgebaut werden. Für die Messung der Eigenschaften von Übertragungskanälen im THz-Frequenzbereich wurden erste Messmöglichkeiten geschaffen, die zur Zeit weiterentwickelt werden. Um die Wirkung nicht-ionisierender THz-Strahlung auf biologische Systeme zu untersuchen, werden Feldexpositionsexperimente und die dazu notwendige Dosimetrie durchgeführt.

Zur Rückführung der Übertragungseigenschaften von Hochfrequenzelektronik im THz-Bereich werden zeitaufgelöste optoelektronische Messverfahren entwickelt. Für die Kalibrierung der Anstiegszeit von Oszilloskopen mit Bandbreiten bis 70 GHz wurde ein optoelektronisches Primärnormal aufgebaut. Zur Zeit wird an Messmöglichkeiten für Oszilloskope mit Bandbreiten bis 110 GHz und an Verfahren zur Messung der vollständigen Übertragungseigenschaften gearbeitet.

## Themenbereich 4: Ionisierende Strahlung

Bearbeitet in den Fachbereichen 6.1 – 6.6		Forschen, Entwickeln	Messen	Beraten
Personaleinsatz (Personenjahre)	2007	102,1	37,8	6,6
	2008	98,6	33,3	5,7
	2009	94,8	32,2	7,0

### Aufgaben und Ziele

Der Themenbereich *Ionisierende Strahlung* verfolgt mit seinen Arbeiten in den folgenden Aufgabenbereichen das Ziel, Fortschritt und Zuverlässigkeit in der Messtechnik der ionisierenden Strahlung für Gesellschaft, Wirtschaft und Wissenschaft sicherzustellen:

1. Darstellung und Weitergabe der SI-Einheiten der Aktivität, der Teilchenfluenz, der Luftkerma, der Energiedosis und der Äquivalentdosis. Es werden Primär- und Transfernormale entwickelt und bereitgestellt, welche die heutigen und die für die Zukunft absehbaren Anforderungen erfüllen. Die PTB sichert damit national und international die Richtigkeit und Einheitlichkeit von Messungen im Bereich ionisierender Strahlung.
2. Weiterentwicklung der Referenzstrahlungsfelder und der messtechnischen Infrastruktur. Dazu gehört die Entwicklung von Detektoren zum Nachweis ionisierender Strahlung für neue Anwendungen.
3. Entwicklung von Messverfahren für die Dosimetrie in Röntgendiagnostik, Strahlentherapie und im Strahlenschutz.
4. Strahlungsmessungen in der Umwelt. Messungen niedriger Dosisleistungen und Aktivitätsmessungen, einschließlich Radon- und Radonfolgeproduktmesstechnik.
5. Bestimmung und Evaluation wichtiger Kern- und Atomdaten (Wirkungsquerschnitte, Verzweigungsverhältnisse, Halbwertszeiten, Emissionswahrscheinlichkeiten, W-Werte, Photonen-Wechselwirkungskoeffizienten) zur Verwendung als Basisdaten für metrologische Anwendungen. Dazu zählen insbesondere Monte-Carlo-Modellrechnungen, z. B. zur Berechnung des Ansprechvermögens von Normalmesseinrichtungen, für die Plasmadiagnostik in der Fusionsforschung, für Korrekturen in der Gammaskopimetrie sowie Teilchenspektrometrien in der Mikro- und Nanodosimetrie.
6. Bereitstellung und Anwendung von Messtechnik und Messverfahren ionisierender Strahlung zum Erhalt bzw. zur Wiederherstellung der Gesundheit der Bürger sowie zum Schutz gegen schädigende Wirkungen ionisierender Strahlung, wie Bauartzulassungen von Orts-, Personen- und Diagnostikdosimetern für Photonenstrahlung und Arbeiten für die Qualitätssicherung im Zusammenhang mit messtechnischen Kontrollen für Therapiedosimeter, Bauartprüfung von Röntgen(stör)strahlern, Prüfung von Rechenprogrammen für die Dosisermittlung des fliegenden Personals, Betrieb der IMIS-Spurenmessstelle sowie Vergleichsmessungen mit Personendosimetern der Messstellen für Photonen-, Beta- und Neutronenstrahlung, Aktivitäts-Messvergleiche der Betreiber kerntechnischer Anlagen und der IMIS-Leitstellen.
7. Gewährleistung der nationalen und internationalen Einheitlichkeit der Messung ionisierender Strahlung, insbesondere die international einheitliche Verwendung der Wasser-Energiedosis in der Strahlentherapie, der Luftkerma in der Strahlendiagnostik, der Strahlenschutz-Messgrößen der ICRU und die Charakterisierung von Referenzmaterialien für Aktivitäts-Messvergleiche durch die intensive Mitarbeit in einer Reihe von internationalen Gremien und durch internationale Vergleiche an Normalen und Normalmesseinrichtungen in Zusammenarbeit mit BIPM, CCRI, EURAMET, COOMET und IAEA.

### Gegenwärtige Situation und geplante Arbeiten

Die Untersuchung der Wirkung ionisierender Strahlung in biologischen Systemen ist eine anspruchsvolle Herausforderung für die zukünftigen Arbeiten, besonders im Bereich der Gesundheit und in der Nanodosimetrie bis hin zu möglichen neuen Einheiten. Im Rahmen des European Metrology Research Programme (EMRP) ist im Mai 2009 ein Aufruf zum Thema „Energy“ erfolgt. In Zusammenarbeit mit anderen NMIs und eingebunden in EURAMET TC-IR soll geprüft werden, zu welchen metrologischen Herausforderungen Projektvorschläge vorbereitet und eingereicht werden können.

**Zu 1.** Die Flüssigszintillationsspektrometrie ist zu einer unverzichtbaren Methode zur Darstellung der Einheit der Aktivität geworden. Der Prototyp einer Messeinrichtung nach der TDCR-Methode soll mit einem Probenwechsler

ausgestattet, um einen Gammakanal erweitert und zu einem Primärnormal weiterentwickelt werden, mit dem dann andere Methoden ersetzt werden sollen. Ein Schwerpunkt der Entwicklung liegt bei Radionukliden, die in der Nuklearmedizin bereits Verwendung finden oder deren zukünftiger Einsatz geplant ist.

Die Darstellung der Einheit der Wasser-Energiedosis wird auf Bremsstrahlungsfelder kleiner Feldquerschnitte ausgedehnt. Nach gegenwärtigen Abschätzungen werden mit dem Wasserkalorimeter Messungen in Feldern mit einem Querschnitt von nicht weniger als 3 cm x 3 cm möglich sein. Die Dosimetrie in noch kleineren Feldern bis hinab zu 1 cm x 1 cm soll mit Hilfe der Alanindosimetrie als Sekundärnormal erfolgen. Mit diesen Forschungsarbeiten wird der zunehmenden Bedeutung neuer Strahlentherapieformen, wie z. B. der intensitätsmodulierten Strahlentherapie (IMRT) Rechnung getragen. Diese Arbeiten sind im Rahmen des iMERA-Plus-Projektes T2.J07 „External Beam Cancer Therapy“ abzuschließen.

Die Entwicklungsarbeiten an den Extrapolationskammern zur Darstellung der Einheit der Wasser-Energiedosis für die Brachytherapie mit Betastrahlern sind abzuschließen. Die Dosimetrie im Nahfeld von Photonenstrahlungsquellen der Nuklide Co-60, Ir-192, I-125 und Pd-103 wird stark nachgefragt. Das Primärnormalmessverfahren basierend auf der Wasserkalorimetrie wird für Strahlungsquellen des Nuklids Ir-192 abgeschlossen. Eine Ausweitung dieses Verfahrens auf Co-60 Quellen ist vorgesehen. Für I-125 und Pd-103 Quellen befindet sich ein ionometrisches Verfahren zur Darstellung der Einheit der Wasser-Energiedosis auf Basis einer Extrapolationskammer in Entwicklung. Im Rahmen des iMERA-Plus-Projektes T2.J06 „Brachytherapy“ sind diese Arbeiten abzuschließen.

Das Absolut-Messverfahren zur Darstellung der Einheit der Wasser-Energiedosis in Feldern von Röntgenstrahlung für die Oberflächen- und palliative Therapie mit Hilfe der Wasserkalorimetrie für den Röhrenspannungsbereich von etwa 70 kV bis 300 kV ist abzuschließen.

Eine verbesserte Freiluftkammer ohne Potentialführungsdrähte zur Darstellung der Luftkerma für weiche Röntgenstrahlung soll entwickelt werden, um die Messunsicherheit zu verringern.

Kalibrierungen von Dosimetern, Aktivitätsmessgeräten und Referenzmaterialien sowie die Weitergabe von Aktivitätsnormalen sollen auf dem Vorjahresniveau weitergeführt werden. Für Neutronenstrahlung wird für Kunden die Messung der spektralen Fluenz vor Ort als Zusatzinformation zum Wert der Äquivalentdosis-Messgröße angeboten. Die Begutachtung von Kalibrierlaboratorien des DKD für die relevanten Messgrößen wird fortgesetzt. Eine Kalibriereinrichtung für Photonen-Großflächenquellen wird aufgebaut.

**Zu 2.** Im Glocker-Bau wurde der reguläre Betrieb der beiden medizinischen Elektronenbeschleuniger des Typs Elekta Precise aufgenommen. Die Primärnormal-Messeinrichtungen zur Darstellung der Einheit der Wasser-Energiedosis werden in den Strahlungsfeldern der Beschleuniger eingesetzt. Die unter der Bezeichnung Forschungsbeschleuniger beschaffte Maschine der Firma ACCEL befindet sich gegenwärtig in der Endphase der Erprobung durch den Hersteller. Mit der Aufnahme des regulären Betriebes ist im Laufe des Jahres 2009 zu rechnen.

Die mit den Ionenbeschleunigern erzeugten monoenergetischen Neutronen-Referenzstrahlungsfelder werden ausgemessen, um die Targetparameter zu kontrollieren oder um neue Targets zu charakterisieren. Die Erhaltung des Strahlbetriebs wird jedoch nach 35 Jahren Betriebszeit zunehmend aufwändiger und kostenintensiv. Die Modernisierung der Beschleunigeranlage wird geplant. Das Modernisierungskonzept muss gewährleisten, dass die PTB nicht nur ihre Kompetenz auf dem Gebiet der Neutronenmetrologie behält, sondern auch in der Lage ist, metrologische Grundlagenforschung für aktuelle und absehbare Entwicklungen zur Nutzung ionisierender Strahlung zu betreiben. Die Anwendung hochenergetischer Ionenstrahlen in der Krebstherapie ist dafür ein wichtiges Beispiel. Der bislang schon sehr erfolgreich eingesetzte Mikro-Ionenstrahl zur gezielten Bestrahlung einzelner Zellkerne soll so weiterentwickelt werden, dass alle Anforderungen für die Durchführung nationaler und internationaler Kooperationen erfüllt werden können.

Das Nanodosimeter wird für orts aufgelöste Detektion der Primärteilchen weiterentwickelt, um die Entstehung von Ionisationsclustern in Abhängigkeit vom Abstand der Teilchenspurs vom nanometrischen Target zu untersuchen, zunächst für Protonen und He-Ionen an den Beschleunigern der PTB. Langfristig soll diese sehr vielversprechende neue Messtechnik zu einer Neudefinition von Strahlenqualitäten für den Bereich der Strahlentherapie mit Hadronen (leichte Ionen, Neutronen), für die Radionuklidtherapie und für strahlenbiologische Experimente am Mikro-Ionenstrahl führen.

Das in den vergangenen Jahren entwickelte elektronische Personendosimeter für gemischte Neutronen-/Photonenstrahlung soll 2009 weiterentwickelt werden, um seine Anwendung auch für hochenergetische Neutronen zu ermöglichen. Die Entwicklung und Charakterisierung von Neutronenspektrometern einschließlich der Entwicklung von Entfaltungsverfahren soll fortgesetzt werden. Konkrete Ziele für 2009 sind die Weiterführung von Untersuchungen zur Spektrometrie der Neutronenstrahlung für die Fusionsforschung (Zusammenarbeit mit ENEA für Messungen am JET und mit IPP für Messungen an ASDEX-Upgrade), von Untersuchungen zur Metrologie für die Plasmadiagnostik, insbesondere im Hinblick auf die Erfordernisse für ITER und erste Schritte der Entwicklung eines Neutronenmonitors für das Fusionsexperiment Wendelstein 7X (IPP Greifswald). Die Entwicklung von Messverfahren für die Radiographie mit schnellen Neutronen für die zivile Sicherheitstechnik wird fortgesetzt.

In 2009 wird eine weltweit einzigartige Röntgen-Bestrahlungsanlage zur Erzeugung von gepulster Strahlung aufgebaut und eine Primärnormalmesseinrichtung zur Darstellung der Einheit Sv für Betastrahlung im Strahlenschutz entwickelt. In beiden Fällen sind spektrometrische Messungen der Strahlungsfelder erforderlich.

**Zu 3.** Im Rahmen eines vom BMU geförderten Forschungsvorhabens wurde eine spezielle Messtechnik für die Dosimetrie in gepulsten Strahlungsfeldern entwickelt. Diese Messtechnik soll für ihren Einsatz an der neuen Röntgen-Bestrahlungsanlage weiterentwickelt werden.

**Zu 4.** Messungen extrem niedriger Aktivitäten werden durch die Low-Level-Radionuklidanalytik ermöglicht. Für die Messung der Radonaktivitätskonzentration in dem Bereich, der häufig in Wohnräumen angetroffen wird, soll eine Kalibriereinrichtung aufgebaut werden.

Messungen niedriger Dosisleistungen werden mit Hilfe der Referenzmessfläche im Freien und im Untergrundlabor UDO durchgeführt. Die Charakterisierung von Neutronenfeldern durch die Messung der Aktivierung in Metallfolien für die Fusionsforschung und als passives Nachweisverfahren soll fortgesetzt werden (Zusammenarbeit mit IRMM für Messungen am JET). Diese Messungen können nur in einem Untergrundlabor durchgeführt werden. Auf Grund des Betreiberwechsels der Schachanlage Asse II zum BfS ist der Weiterbetrieb des Untergrundlabors UDO nicht sichergestellt. In Abstimmung mit dem BfS wird derzeit nach einem anderen geeigneten Standort für ein Untergrundlabor und nach Modalitäten für dessen Betrieb gesucht.

**Zu 5.** Folgende Basis-Daten sollen ermittelt werden: Halbwertszeiten sehr langlebiger Radionuklide für geo- und kosmologische Datierungsmethoden; Streu- und Aktivierungswirkungsquerschnitte für Neutronen im Energiebereich von 2 MeV bis 15 MeV für die Fusionstechnologie und die Transmutation nuklearer Abfälle (Zusammenarbeit mit der TU-Dresden); W-Werte für Protonen und He-4-Ionen in Gasen für die Dosimetrie mit Ionisationskammern in der Strahlentherapie mit Protonen und schweren Ionen; differentielle elastische und doppelt-differentielle unelastische Wirkungsquerschnitte von Elektronen und totale Ionisationswirkungsquerschnitte von Protonen und He-4-Ionen in Bestandteilen der DNA für die Berechnung von Teilchenspuren in der Nanodosimetrie. Die PTB ist Partner im EU-geförderten Projekt EFNUDAT, dessen Ziel es ist, alle notwendigen Maßnahmen zusammenzuführen, um u. a. Messungen von Kerndaten mit hoher Qualität für den Bereich der Transmutation von nuklearem Abfall und für Reaktorkonzepte der Generation IV zu unterstützen.

**Zu 6.** Die Anzahl der Bauartprüfungen bzw. Zulassungen von Orts- und Personendosimetern, Diagnostikdosimetern sowie Röntgen- und Störstrahlern wird auf dem Vorjahresniveau erwartet. Für die Beratung der Messstelle für die messtechnischen Kontrollen für Therapiedosimeter, die Vergleichsmessungen mit Personendosimetern und die Aktivitätsvergleiche ist mit dem gleichen Aufwand wie 2008 zu rechnen. Unter Anwendung der im Aufbau befindlichen Röntgen-Bestrahlungsanlage zur Erzeugung von gepulster Strahlung soll die Bauartprüfung von Strahlenschutzdosimetern auf derartige Felder erweitert werden. Die Anzahl der Aktivitäts-Messvergleiche für Betreiber kerntechnischer Anlagen und für IMIS-Laboratorien (in Zusammenarbeit mit den IMIS-Leitstellen) wird auf dem Vorjahresniveau erwartet.

Die Durchführung von Forschungsvorhaben des BMVBS und des BMU zur Dosimetrie in Flughöhen und zum Strahlenschutz für das fliegende Personal soll in den nächsten Jahren weitergeführt werden. Dabei steht die Untersuchung der Auswirkung von energiereichen Sonneneruptionen auf die Ortsdosisleistung in Flughöhen im Mittelpunkt.

**Zu 7.** Die intensive Mitarbeit in den internationalen Gremien von ISO, IEC, CEN, CENELEC, IAEA, ICRP und ICRU ist fortzusetzen, um die internationale Normung so zu beeinflussen, dass das hohe deutsche Qualitätsniveau in der Strahlentherapie (Dosimetrieprotokolle) und im Strahlenschutz (Anforderungen an Orts- und Personendosimeter) langfristig erhalten bleibt.

Folgende Vergleichsmessungen werden in 2009 begonnen oder weitergeführt:

- CCRI Schlüsselvergleich der Reference Air Kerma Rate von Ir-192-Strahlern (CCRI(I)-K7.Ir-192).
- CCRI-Schlüsselvergleiche der Aktivität für die Radionuklide H-3 (CCRI(II)-K2.H-3), Kr-85 (CCRI(II)-K2.Kr-85), Lu-177 (CCRI(II)-K2.Lu-177). Weitere Vergleichsmessungen nach Absprache im CCRI(II).
- CCRI-Schlüsselvergleich für die Fluenz thermischer Neutronen (CCRI(III)-K8).
- EURAMET-Vergleichsmessungen für die Messgröße  $H_p(10)$  in Photonenstrahlungsfeldern (Nr. 738) und für die Aktivität und die Photonenemissionswahrscheinlichkeiten von Cu-64 (Nr. 1085).
- Bilateraler Vergleich mit dem NIST der Air Kerma Strength von I-125-Strahlern.
- Bilateraler Vergleich mit dem VNIIM für die Messgröße  $H_p(0,07)$  in Betastrahlungsfeldern.

## Themenbereich 5: Länge, dimensionelle Metrologie

Bearbeitet in den Fachbereichen * 5.1, 5.2, 5.3, 5.4, 4.2, 4.3 (50%)		Forschen, Entwickeln	Messen	Beraten
Personaleinsatz (Personenjahre)	2007	101,7	47,0	13,5
	2008	114,5	32	10,6
	2009	116,6	30,2	9,9

### Aufgaben und Ziele

Der Themenbereich *Länge und dimensionelle Metrologie* behandelt die sich aus dem gesetzlichen Auftrag zur Weitergabe der Längeneinheit und der daraus abgeleiteten dimensionellen Messgrößen an Industrie und Wissenschaft ergebenden Aufgaben. Diese umfassen ein adäquates messtechnisches Beratungs- und Dienstleistungsangebot (Kalibrierungen in Abstimmung mit dem Angebot des DKD, in geringem Umfang auch Bauartzulassungen) sowie die Entwicklung von verbesserten, den künftigen Anforderungen gerecht werdenden Messverfahren und die normative Umsetzung der entwickelten Mess- und Kalibrierverfahren. Die Aufgaben sind im Einzelnen:

1. Darstellung und Weitergabe optischer Frequenznormale; Weitergabe der Längeneinheit über Gitter
2. Entwicklung interferometrischer Messverfahren zur Weitergabe der Längeneinheit
3. Entwicklung einer rückführbaren Messtechnik für die Nanotechnologie
4. Messtechnik für die Mikrosystemtechnik, Feinwerktechnik und Oberflächenmesstechnik
5. Messtechnik für die Halbleiterindustrie
6. Messtechnik für die Optische Industrie
7. Messtechnik für den Maschinenbau: Automobil, Werkzeugmaschinen, Luft- und Raumfahrt, ...

Übergeordnetes Ziel in allen Bereichen ist es, eine adäquate messtechnische Infrastruktur zu schaffen (Realisierung, Grundlagen, Verfahren, Normale, Weitergabe, Anwendung), um aktuellen wie künftigen Anforderungen aus industrieller Präzisionsfertigung und Wissenschaft begegnen zu können. Hierbei lassen sich unabhängig von der jeweils vorliegenden messtechnischen Fragestellung folgende gemeinsame Aspekte der F&E-Arbeiten formulieren:

- Analyse des für die Fragestellung am besten geeigneten Messprinzips,
- Beschreibung der messtechnisch relevanten Eigenschaften der Sensor-Messobjekt-Paarung,
- Entwicklung von Kalibrierverfahren und deren Validierung durch internationale Vergleichsmessungen,
- Nutzung von mathematischen Verfahren zur Fehlertrennung: Extraktion der Messobjektinformation, die von systematischen Messgeräteabweichungen überlagert ist,
- Entwicklung und Fertigung von geeigneten Normalen,
- Entwicklung und Umsetzung von Konzepten zur Internet-basierten Softwarevalidierung,
- Entwicklung von Verfahren zur Ermittlung der anwendungsspezifischen Messunsicherheiten,
- F&E zur Gewährleistung der Rückführbarkeit auch im produktionsnahen Umfeld.

F&E-Arbeiten werden überwiegend im Rahmen von drittmittelgeförderten Vorhaben durchgeführt, häufig mit starker Industriebeteiligung. Im iMERA-Plus-Programm werden aktuell vier gemeinsame Projekte (JRP) im Themenbereich 5 bearbeitet: Traceable characterization of nanoparticles (Nanoparticle), New traceability routes for nanometrology (Nanotrace), Metrology for new industrial measurement technologies (NIMTech) und Novel techniques for absolute long range distance measurements in air (Long Range).

### Gegenwärtige Situation und geplante Arbeiten

**zu 1.** Die Arbeiten verfolgen u. a. folgende Ziele: Bereitstellung und Verbreitung optischer Frequenznormale über Fasernetze, Darstellung von Frequenznormalen im sichtbaren und Infrarot-Spektralbereich sowie Charakterisierung von Gitternormalen zur Weitergabe der Längeneinheit. Hierzu werden folgende Arbeiten durchgeführt:

- Realisierung eines dauerbetriebsfesten Nahinfrarot-(NIR)-fs-Kamms für die optische Frequenzmessung
- Bereitstellung und Verbreitung stabilisierter Laser im sichtbaren und infraroten Spektralbereich
- Weitergabe der Längeneinheit über Gitternormale, kalibriert mittels optischer Diffraktometrie
- Neubestimmung des <sup>28</sup>Si-Gitterparameters mittels Kombination von optischem und Röntgeninterferometer
- Präzisions-Wellenlängenbestimmung mit Hilfe von Mössbauerstrahlung bei 14,4 keV und eines Fabry-Perot-Interferometers für sichtbare und Röntgenstrahlung

\* Messverfahren der dimensionellen Metrologie mit **Synchrotronstrahlung** sind im Themenbereich 9 „Radiometrie und Photometrie“ beschrieben.

**zu 2.** Die Arbeiten konzentrieren sich auf die Weiterentwicklung interferometrischer Messverfahren zur Weitergabe der Längeneinheit mittels optischer Interferometrie im Vakuum und in Luft:

- Weiterentwicklung des Kugelinterferometers zur Neubestimmung der Avogadro-Konstante sowie zur Rückführung der Dichte
- Weiterentwicklung Kamera-basierter Messungen von Phasentopographien am Ultrapräzisionsinterferometer zur Darstellung von Längen von Probekörpern bis 400 mm mit Unsicherheiten  $< 0,5$  nm im Vakuum
- Längenmessungen an endmaßähnlichen Körpern in einem erweiterten Temperaturbereich, zunächst bis 77 K
- Weiterentwicklung beidseitig antastender Interferometer zur Messung endmaßähnlicher Körper
- Grundlagenuntersuchungen zur Phasensprungkorrektur an optischen Oberflächen
- Weiterentwicklung von Messmethoden zur hochgenauen Bestimmung der Brechzahl von Luft
- Weiterentwicklung von Verfahren zur Weitergabe der Längeneinheit bis 50 m
- Entwicklung eines fs-Laser-basierten Längenmesssystems zur Messung von Entfernungen bis 1 km
- Brechzahlmessungen über lange Strecken mittels Zweiwellenlängeninterferometrie und spektroskopischer Feuchtemessungen
- Weiterentwicklung von Verfahren zur interferometrischen Absolutabstandsmessung mit Diodenlasern
- Rückführbare Absolutinterferometrie unter Verwendung von molekularen Absorptionslinien
- Entwicklung eines interferometrischen Messplatzes zur Messung kleiner Winkel und zur Bestimmung von Interpolationsfehlern von Winkelencodern.

**zu 3.** Kennzeichnend für die Nanotechnologie ist die starke Verknüpfung von dimensionellen mit anderen physikalischen und chemischen Eigenschaften. Die Aufgaben erstrecken sich über die Gebiete Nanopartikel-, Nanostruktur-, Schichtdicken-, Rauheits- und Härtemesstechnik. Es werden bearbeitet:

- Untersuchungen und Simulationsrechnungen der Sensor-Oberfläche-Wechselwirkung in hochauflösenden Mikroskopieverfahren (SEM, DUV-Mikroskopie, Rastersondenmikroskopie, aber auch Scatterometrie)
- Realisierung einer neuen Generation von höchstauflösenden Metrologie-Rastersondenmikroskopen
- Entwicklung von Normalen auf der Basis kristalliner Oberflächen
- Entwicklung einer Kraftmesseinrichtung für den Bereich  $10^{-5}$  bis  $10^{-12}$  N sowie notwendiger Transfornormale
- Weiterentwicklung der Röntgeninterferometrie in Kombination mit optischer Interferometrie und Rastersondenmikroskopie für die hochpräzise Positionsbestimmung an Nanostrukturen
- Entwicklung neuartiger Sensorsysteme für taktile und optische Oberflächenuntersuchungen
- Entwicklung mikroskopischer u. integraler Messtechnik für diffraktive, nanostrukturierte optische Elemente
- Entwicklung und Kalibrierung von Normalen für die dimensionelle Messtechnik im Nanometerbereich
- Entwicklung von Rückführungsketten für die Nanopartikel-Messtechnik mit mikroskopischen und integral messenden Verfahren (STEM-Messungen, statische und dynamische DUV Streulichtmessungen).

**zu 4.** Die diesem Gebiet zuzuordnenden aktuellen Arbeiten konzentrieren sich zurzeit auf folgende Themen:

- Entwicklung von Sensoren für die Messtechnik an Mikrostrukturen mit hohem Aspektverhältnis
- Modellierung des Antastvorganges bei taktilen und optischen Sensoren
- Entwicklung von Mikroprüfkörpern in Anlehnung an die Prüfkörper der Makro-Koordinatenmesstechnik
- Entwicklung eines Mehrwellenlängen-Diodenlaserinterferometers zur Messung der Formabweichung an dünnen Drähten sowie Fasern
- Realisierung von lichtmikroskopischen 2D-Messungen an Mikrostrukturen (Größe, Form und Lage)
- Modellierung von Strukturen und Realisierung von Normalen für neue 3D-Rauheitskenngrößen (ISO 25178)
- Untersuchung neuer Filterverfahren für die Oberflächenmesstechnik, Einbindung in die Referenzsoftware RPTB, Messunsicherheit für softwaregestützte Auswerteverfahren für Kunden
- Anwendung des Konzeptes des „virtuellen Messgerätes“ zur Bestimmung von Messunsicherheiten für komplexe Messaufgaben
- Entwicklung eines hochauflösenden Tastschnittgerätes für normgerechte 2D- und 3D-Oberflächenmessungen
- Aufbau und Erprobung neuer Verfahren für form- und stoffschlüssiges Verbinden von Mikrokomponenten
- Erprobung und Optimierung neuer Bearbeitungsmöglichkeiten, z. B. Anwendung eines Lasers zur Mikrostrukturierung sowie die Kombination von Verfahren zur Herstellung neuartiger Dünnschichtsensoren .

**zu 5.** In diesem Bereich liegt der Schwerpunkt auf Arbeiten in der Maskenmetrologie sowie der präzisen Charakterisierung von funktionskritischen Materialeigenschaften. Aktuelle Arbeiten sind:

- Weiterentwicklung des Nanometerkomparators (1D-Vakuum-Interferenzkomparator) zu einem Referenzmessgerät für Positionen und Geradheiten von mikro- und nanostrukturierten Teilungen auf 1D- und 2D-Normalen mit den geforderten geringen Messunsicherheiten im (sub-)nm-Bereich.

- Weiterentwicklung des Monte-Carlo-Programmes MCSEM zur Simulation von REM-Kontrasten an 3D-Nanostrukturen sowie Anwendung in der elektronenstrahlbasierten Metrologie und Lithografie
- Weiterentwicklung eines rastersondenmikroskopischen Messsystems für große, planare Messobjekte bis zu 300 mm Größe, insbesondere im Hinblick auf kantenempfindliche Antastverfahren von 3D-Nanostrukturen
- Mitarbeit im BMBF-Verbundprojekt CDuR32: Critical Dimension (CD)- und Registration-Maskenmetrologie (vergleichende Strukturbreitenmesstechnik, Evaluierung scatterometrischer Messverfahren mit Wellenlängen von 193 nm bis zu 13 nm, Metrologie mit 193 nm Mikroskopie, CD-SEM-Metrologie; Charakterisierung von CD-Normalen künftiger Technologiegenerationen  $\leq 32$  nm, Positions- und Geradheitsmetrologie)
- Hochgenaue Untersuchung der thermischen Ausdehnungseigenschaften metrologie- und hochtechnologie-relevanter Materialien, insbesondere für die EUV-Lithografie (z. B. Längenrelaxation,  $\alpha$ - Homogenität); Weiterentwicklung hinsichtlich kleinerer Messunsicherheit und größerem Temperaturbereich
- Bestimmung der thermischen Ausdehnung von Probekörpern, welche nicht direkt interferometrisch gemessen werden können. Dazu Entwicklung von Anordnungen zur Nachbildung endmaßähnlicher Körper
- Charakterisierung von Längen(-Instabilitäten) in komplexen Anordnungen mit Unsicherheiten von 1 nm
- Entwicklung von scatterometrischen und ellipsometrischen Messverfahren für die dimensionelle Metrologie
- Implementierung von rigorosen Algorithmen zur Berechnung der Wechselwirkung optischer Felder mit strukturierten Oberflächen, Erweiterung auf 3D-Strukturen
- Nutzung des Prinzips der strukturierten Beleuchtung für die optische Strukturbreiten-Messung.

**zu 6.** Der Schwerpunkt liegt hier auf der optischen Formmessung mit Unsicherheiten von nm und sub-nm an optischen Oberflächen mit geringer Rauheit. Zur rückführbaren Messung der Form optischer Funktionsflächen werden neue Messverfahren entwickelt und Messaufbauten realisiert. Folgende Aktivitäten werden verfolgt:

- Fortführung der Forschung und Entwicklung zur ultrapräzisen Planflächenmessung
- Weiterentwicklung des optischen Freiformflächenmessgerätes für große Oberflächen
- Realisierung des Großflächentopografiemesssystems zur Ebenheitsmessung optischer Oberflächen mit Ausdehnungen von bis zu 1 m
- Fortführung von Forschung und Entwicklung des neuen rückführbaren Asphären-Messverfahrens in Zusammenarbeit mit dem Themenbereich 12 „Mathematische Modellierung und Datenanalyse“
- Entwicklung von Verfahren und Geräten zur Messung kleiner Winkel, insbesondere Autokollimatoren (AK), Qualifizierung für Topografiemessverfahren, Simulation des Abbildungsverhaltens von AK
- Entwicklung neuer AK-Kalibrierverfahren (Abstandsabhängigkeit, 2D-Kalibrierung)
- F&E zur Winkelmetrologie für deflektometrische Topografiemessverfahren bspw. für Synchrotronoptiken
- Transfer der linearen optischen Multisensorsmesstechnik in die Industrie
- Nutzung von *phase retrieval*-Verfahren zur Charakterisierung optischer Systeme.

**zu 7.** Prüfung geometrischer Festlegungen für Werkstücke oder Prüflinge mit Hilfe von 1D-, 2D-, oder 3D-Verfahren. Zum Einsatz kommen taktile und nicht-taktile Erfassungstechniken, wie etwa Taster, optische Sensoren oder röntgenografische/tomografische Verfahren. Zu den laufenden Arbeiten zählen:

- Ermittlung und Verringerung der Messunsicherheit von Zylinderkoordinatenmessgeräten z. B. für die hochgenaue Kalibrierung von Drucknormalen zur Neubestimmung der Boltzmannkonstanten
- Kalibrierung von Koordinatenmessgeräten (KMG) durch parametrische Multilaterationsverfahren
- Aufgabenspezifische Kalibrierung von Werkstücken auf Koordinatenmessgeräten durch Integration unabhängiger metrologischer Rahmen mittels nachführbarer Laserinterferometer
- Aufbau einer normgerechten Referenzwand zur Qualifikation von Lasertrackern und photogrammetrischen Messsystemen
- Röntgen-CT-Messungen: Bestimmung und Verringerung der Messunsicherheit, Entwicklung von Normalen, Prüfung von Simulations- und Rekonstruktionsverfahren, Entwicklung volumetrischer morphologischer Filter
- Entwicklung und Test geometrischer Normale zur Charakterisierung von optischen Sensoren und Messsystemen
- Entwicklung von Verzahnungs- und Gewindemessverfahren mit verringerter Messunsicherheit
- Errichtung einer Infrastruktur zur Internet-basierten Validierung von Auswertalgorithmen
- Rückführung von Algorithmen zur 3D-Verzahnungsmessung
- Entwicklung von Verfahren und Vorrichtungen für die Messung von Mikroverzahnungen
- Entwicklung und Rückführung von Verfahren zur Rückführung von 3D-Prüfkörpern bis 5 m Größe
- Weiterentwicklung des Virtuellen KMG für Verzahnungsmessgeräte und Lasertracker sowie die Berücksichtigung von Formeinflüssen von Werkstückoberflächen
- Entwicklung von Messverfahren für die Geometrie von Härteeindringkörpern
- Aufbau einer Normalmesseinrichtung für die dynamische Härtemessung.

## Themenbereich 6: Masse und abgeleitete Größen

Bearbeitet in den Fachbereichen 1.1, 1.2, 1.3 (30%), 3.3 (40%), 4.3 (25%), 7.5 (35%)		Forschen, Entwickeln	Messen	Beraten
Personaleinsatz (Personenjahre)	2007	32,5	23,4	10,0
	2008	32,7	20,6	9,4
	2009	40,3	20,0	8,1

### Aufgaben und Ziele

Im Themenbereich *Masse und abgeleitete Größen* wird – basierend auf dem Einheiten- und Zeitgesetz, dem Eichgesetz sowie der Einheitenverordnung und der Eichordnung – an der Darstellung und Weitergabe der mechanischen Einheiten für Masse, Kraft, Drehmoment und Druck (auch Vakuumbereich) gearbeitet. Der Bereich zeichnet sich durch große Industrienähe aus, mit einer sehr hohen Anzahl an Kalibrierungen, Prüfungen und Zulassungen mit jährlichen Einnahmen von über 1 Million Euro. Um die derzeitigen und künftigen Anforderungen aus Industrie, Wissenschaft und Forschung an genaue Messungen zu erfüllen, werden folgende Aufgaben bearbeitet:

1. Massebestimmung von Siliziumkugeln im Rahmen des Avogadro-Projektes mit einer relativen Unsicherheit kleiner als  $1 \cdot 10^{-8}$ .
2. Vorbereitende Untersuchungen zur praktischen Realisierung und Weitergabe der Masseneinheit nach einer möglichen Neudefinition.
3. Ausbau und Weiterentwicklung der Normalmesseinrichtungen für statische Kräfte von 1 N bis 16,5 MN und Drehmomente von 1 mN·m bis 1,1 MN·m mit relativen Unsicherheiten zwischen  $1 \cdot 10^{-5}$  und  $1 \cdot 10^{-3}$ , abhängig vom Funktionsprinzip und Messbereich der Messeinrichtungen, und Realisierung von Normalmesseinrichtungen für kleine Kräfte (zwischen 100  $\mu$ N und 1 N), sowie messtechnische Untersuchung der Normalmesseinrichtungen für kleine Drehmomente (1 mN·m bis 1 N·m), Erweiterung der Kraft-Normalmesseinrichtungen auf Mehrkomponenten (Kraft und Moment).
4. Realisierung bzw. Erweiterung von Normalmesseinrichtungen für dynamische Kräfte und Drehmomente, u.a. für sinusförmige Kräfte (Frequenzen bis 1 kHz im Bereich 10 N bis 10 kN, bis 100 Hz im Bereich bis 100 kN) und stoßförmige Kräfte bis 250 kN.
5. Entwicklung von interferometrischen Normalmesseinrichtungen (NME) zur Darstellung und Weitergabe der SI-Einheiten für dynamischen Druck; Entwicklung und Aufbau einer automatisierten Einrichtung zur Messung von Halte- oder Widerstandskräften bis 12 kN.
6. Sicherung der Druckskala für Höchstdruckaufnehmer bis 1,3 GPa und Verbesserung der Druckskala zwischen 0,01 Pa und 1 kPa.
7. Entwicklung von Druck-Primärnormalen mit einer relativen Unsicherheit von kleiner  $1 \cdot 10^{-6}$  im Rahmen der Neubestimmung der Boltzmann-Konstante.
8. In der Vakuummetrologie wird das Normal für Testleckkalibrierungen modernisiert und die optische Partialdruckmessung durch Bestimmung von geeigneten Linienstärken auf Wasserdampf ausgedehnt.
9. Kalibrierung und Prüfung von Massennormalen, Gewichtssätzen, Kraft-, Drehmoment- und Druckaufnehmern, Ergometern, Vakuummessgeräten sowie Prüfung, Bauartzulassung und Zertifizierung von Waagen und Waagenmodulen, außerdem Begutachtungen von DKD-Laboratorien für Masse, Kraft, Drehmoment, Druck, Waagen und Werkstoffprüfmaschinen.

Im Rahmen der Arbeitsplanbesprechungen sind die Forschungsansätze zur dynamischen Messung mechanischer Größen als Bereich mit Ausbaupotential bestimmt worden.

### Gegenwärtige Situation und geplante Arbeiten

**Zu 1.** Die Neubestimmung der Avogadro-Konstanten mit Hilfe eines kugelförmigen Einkristalls aus nahezu isotonenreinem  $^{28}\text{Si}$  ist ein wichtiger Schritt auf dem Weg zur Neudefinition des Kilogramms über eine Fundamentalkonstante. Die Bestimmung der Kugelmasse erfolgt in Zusammenarbeit mit dem BIPM. Durch den Einsatz spezieller Auftriebskörper und eines 1-kg-Vakuum-Massekomparators konnte die relative Standardunsicherheit ( $k = 1$ ) der Massebestimmung in Luft von bisher ca.  $2 \cdot 10^{-8}$  auf  $1,2 \cdot 10^{-8}$  reduziert werden. Für die Massebestim-

mung im Vakuum wurde eine relative Standardunsicherheit von  $8,3 \cdot 10^{-9}$  erreicht. Im Ergebnis internationaler Vergleichsmessungen mit dem BIPM und dem NMJJ (Japan) konnten beide Unsicherheitsangaben bestätigt werden. Erste Messungen an den für das Avogadro-Projekt hergestellten  $^{28}\text{Si}$ -Kugeln sind im Frühjahr und im Herbst 2009 geplant. Ziel zukünftiger Arbeiten ist die weitere Verringerung der Unsicherheitsanteile der Luftauftriebs- und der Sorptionskorrektur. Hierzu ist u. a. der Einsatz von Auftriebskörpern mit einer größeren Volumendifferenz und von in Kooperation mit dem BIPM hergestellten Sorptionskörpern aus Platin-Iridium vorgesehen.

**Zu 2.** Die praktische Realisierung und Weitergabe der Masseneinheit stellt nach einer möglichen Neudefinition neue Anforderungen an die Massemetrologie. So muss die Masseneinheit im Anschluss an eine Realisierung im Vakuum bewahrt und nach einem Vakuum-Luft-Transfer weitergegeben werden. Damit die derzeitigen Unsicherheitsanforderungen bei der Weitergabe der Masseneinheit auch nach einer Neudefinition eingehalten werden können und das bestehende System der Genauigkeitsklassen von Gewichtstücken nicht gefährdet wird, sind an die Bewahrung und die Weitergabe der Einheit vergleichbare Unsicherheitsanforderungen zu stellen, wie an die Realisierung selbst. Vorbereitende Untersuchungen und internationale Vergleichsmessungen sind erforderlich, um die Massestabilität der verwendeten Normale bei der Aufbewahrung und dem Transport unter Vakuumbedingungen bzw. Schutzgas, bei dem Transfer zwischen Vakuum und Luft und bei der Anwendung von Reinigungsprozeduren abschätzen zu können. Die geplanten Arbeiten und Vergleichsmessungen werden in Zusammenarbeit mit der CCM Task Group 1 „Mass metrology under vacuum for a *mise en pratique*“ durchgeführt.

**Zu 3.** Für statische Kräfte deckt die PTB derzeit den Messbereich von 1 N bis 16,5 MN ab, mit relativen Messunsicherheiten von  $\leq 2 \cdot 10^{-5}$  (bis einschl. 2 MN) bzw.  $1 \cdot 10^{-4}$  (über 2 MN). Um den mittelfristigen Anforderungen der Industrie nachzukommen, sollen die Normalmesseinrichtungen mit speziell entwickelten Transfornormalen auf systematische Einflussgrößen, z. B. Krafteinleitungseffekte, Kriechverhalten, Temperatureinfluss, magnetische Nebenschlusseffekte und Belastungsverlauf, untersucht und so verbessert werden, dass die Messunsicherheit auf bis zu  $1 \cdot 10^{-5}$  sinkt. Weiterhin sollen die vorhandenen Messeinrichtungen für Kraft und Drehmoment modernisiert und automatisiert werden, um auch zeitaufwändige Untersuchungen mit den vorhandenen Personalressourcen durchführen zu können.

In Forschung und Industrie wächst der Bedarf auch nach rückgeführten Kraft- und Drehmomentkalibrierungen für kleinere Messbereiche, d. h. zwischen 1 mN und 1 N bzw. zwischen 1 mN·m und 1 N·m. Daher wurden Normalmesseinrichtungen für kleine Kräfte und Drehmomente entwickelt und aufgebaut. Es ist vorgesehen, diese Messeinrichtungen hinsichtlich ihrer Messunsicherheit und Langzeitstabilität zu analysieren, so dass sie zukünftig als Normale für Kalibrierungen eingesetzt werden können. Im Messbereich von 1 mN bis 1 N sollen dabei relative Messunsicherheiten von  $1 \cdot 10^{-3}$  bis zu  $1 \cdot 10^{-4}$  erreicht werden. Durch die Entwicklung einer neuen Messeinrichtung soll der untere Messbereich zwischen 100 µN und 100 mN verbessert werden. Die neu entwickelte Normalmesseinrichtung für Drehmomente bis 1 N·m muss weiter untersucht werden, um die erforderliche Genauigkeit (relative Messunsicherheit höchstens  $5 \cdot 10^{-5}$ ) unter Berücksichtigung der Langzeitstabilität sicherzustellen.

Auch bei Mehrkomponentensensoren für Kraft und Drehmoment ist eine zunehmende Nachfrage nach rückführbaren Kalibrierungen seitens der Industrie zu verzeichnen, so dass neben Grundlagenuntersuchungen und der Realisierung neuer Messverfahren auch mit der Erweiterung der Normalmesseinrichtungen auf Kraft und Moment begonnen worden ist. Es ist geplant, diese Messmöglichkeiten entsprechend dem Bedarf (Axialkraft bis 1 MN, Querkraft bis 1 kN, Moment bis 1 kN·m) zu erweitern.

**Zu 4.** Bei zeitlich veränderlichen Kraftverläufen, die speziell in sicherheitsrelevanten Bereichen, wie z. B. Materialprüfung oder Crash-Tests, auftreten, können die dynamischen Eigenschaften von Kraftaufnehmern zu fehlerhaften Messresultaten führen. Daher wurden in der PTB neue, weltweit einzigartige Messeinrichtungen zur Erzeugung definierter dynamischer Kräfte entwickelt und aufgebaut. Hiermit werden die unterschiedlichen dynamischen Einflüsse messtechnisch mit periodischen Kräften von bis zu 10 kN (Frequenzen bis 1 kHz) bzw. bis zu 100 kN (Frequenzen bis 100 Hz) untersucht. Nach der Fertigstellung der neuen Messeinrichtungen können jetzt erstmalig größere Messbereiche abgedeckt werden und damit auch größere Kraftmessgeräte in den für Forschung und Industrie relevanten Teilbereichen näher untersucht werden. Nach Fertigstellung und Untersuchung dieser Messeinrichtungen soll die dynamische Kraft in das Leistungsverzeichnis mit aufgenommen werden, um zukünftig rückführbare Messungen für dynamische Kräfte als Kalibrierung anzubieten. Darüber hinaus werden ausgewählte Kraftmessgeräte und neu entwickelte Krafttransfornormale untersucht, um mit bekannten dynamischen Krafttransfornormalen Rückführungen für spezielle Anwendungen zu ermöglichen.

Für stoßförmige Kräfte wird bis Ende 2009 eine NME für Kräfte bis 250 kN fertiggestellt, um anschließend auch Kraftaufnehmer größerer Bauform und Kapazität mit stoßförmiger Belastung untersuchen und rückgeführt kalibrieren zu können. Parallel dazu werden die Arbeiten am Aufbau einer NME zur dynamischen Kalibrierung von Drehmomentenaufnehmern mit sinusförmiger Belastung wieder aufgenommen. Auch die Kalibrierung von Drehmomentenaufnehmern zur rückführbaren Messung dynamischer Drehmomente wird von der Industrie zunehmend benötigt (z. B. Automobilindustrie, Energieerzeuger). Deshalb ist geplant, in Zusammenarbeit mit der In-

dustrie Drehmomentaufnehmer auf ihre Eignung für dynamische Messungen zu untersuchen und Verfahren für reproduzierbare Messungen und für die Rückführung auf die nationalen Normale für Drehmoment zu entwickeln.

Alle in diesem Abschnitt genannten Aufgaben sind nicht nur in Deutschland, sondern auch europaweit von Interesse und finden sich entsprechend im Europäischen Metrologieforschungsprogramm (EMRP) bzw. den iMERA-Roadmaps („Dynamic measurements“) wieder.

**Zu 5.** Bisher einzigartige Messanlagen zur Erzeugung und Erfassung von kurzzeitigen halbsinusförmigen Gasdruckimpulsen bzw. hydraulischen Druckimpulsen (mit interferometrischer Bestimmung des Eingangsdrucks) werden für die Kalibrierung von piezoelektrischen Druckaufnehmern für 20 MPa bzw. 800 MPa aufgebaut (insbesondere für Dieselmotoren und Explosionsschutz mit Drücken bis 20 MPa, bzw. für Ballistik, Einspritzpumpen für Kraftstoffe und Spritzgussverfahren bis 800 MPa), um die Anforderungen der Industrie nach rückgeführten Messgeräten für den dynamischen Druck erfüllen zu können. Für die Zulassung von Blockiersystemen für Erbwaffen als neuer gesetzlicher Aufgabe der PTB ist es erforderlich, eine Einrichtung zur Messung von Widerstands- und Haltekräften bis 12 kN zu entwickeln und aufzubauen.

**Zu 6.** Im Höchstdruckbereich von 1 GPa bis 1,6 GPa gibt es einen wachsenden Bedarf für Kalibrierungen von Druckaufnehmern, da es vermehrt Anwendungen in diesem Druckbereich gibt (Autofrettage, Sterilisation von Lebensmitteln). Die existierende Kalibriereinrichtung bis 1,3 GPa verursacht einen erheblichen Wartungsaufwand und kann auch nicht für einen Messbereich bis 1,6 GPa erweitert werden. Eine neue Kalibriereinrichtung, basierend auf den neuesten Methoden und Erkenntnissen der Festigkeitsanalyse, der Werkstoffe und der Dichtungstechnik, soll deshalb in Zusammenarbeit mit der Industrie entwickelt werden.

Im Vakuumbereich soll die Unsicherheit der Druckdarstellung zur Erhaltung der internationalen Spitzenstellung der PTB um eine Größenordnung verringert werden, zunächst im Bereich von 30 Pa bis 1000 Pa durch Einsatz einer neuartigen Druckwaage, dann im Bereich unter 30 Pa durch Neubau eines Primärnormals nach dem statischen Expansionsverfahren.

**Zu 7.** Im Rahmen der Neubestimmung der Boltzmann-Konstante sollen Primärnormale mit einer relativen Unsicherheit kleiner  $1 \cdot 10^{-6}$  für einen Druckbereich von 0,1 bis 7 MPa entwickelt werden. Dazu werden im Rahmen einer Kooperation mit einem Industriepartner gemeinsam neue Druckwaagen entwickelt.

**Zu 8.** Im Vakuumbereich werden die Messungen für den Schlüsselvergleich CCM.P-K12 für Testleckkalibrierungen abgeschlossen und der Draft A im Jahre 2009 erstellt. Der betroffene Messplatz zur Kalibrierung von Testlecks wird automatisiert, um dem steigenden Kalibrieraufkommen von Kunden gerecht zu werden. Im Rahmen eines Projekts mit einer Industriefirma soll künftig auch die Kalibrierung von Testlecks für Luft ermöglicht werden. Neuartige, mit fokussierten Ionenstrahlen hergestellte Lecks im Nanometerbereich werden im Rahmen einer Zusammenarbeit mit der Universität Genua getestet. Bei der optischen Partialdruckmessung wird die Bestimmung der Linienstärken für geeignete Wasserdampfabsorptionslinien durchgeführt und die Linienstärke für CO<sub>2</sub> bei bekannter Isotopenzusammensetzung abgesichert.

**Zu 9.** Der hohen Anzahl an Kalibrierungen, Prüfungen und Zulassungen entsprechend wird in erheblichem Umfang in normativen Gremien (DIN, VDI, EA, WELMEC, CEN/CENELEC, ISO, OIML, ...) und insbesondere an mehr als 20 nationalen und internationalen Regelwerken kontinuierlich mitgearbeitet, wobei sich der Schwerpunkt von der nationalen Ebene auf die europäische und weltweite Ebene verlagert (Beispiel: Europäische Bauartzulassungen nach der Messgeräte richtlinie MID, Erstellung von EU-Normen und OIML-Empfehlungen). Für den gesamten Themenbereich gibt es außerdem in Deutschland mehr als 140 Kalibrierstellen, bei denen über Anschlussmessungen durch die PTB die Rückführbarkeit auf die nationalen Normale gewährleistet werden muss. Dieser hohe Aufwand wird mittelfristig erhalten bleiben.

## Themenbereich 7: Metrologie in der Chemie, Stoffeigenschaften

Bearbeitet in den Fachbereichen 3.1, 3.3, 3.2 (60%)		Forschen, Entwickeln	Messen	Beraten
Personaleinsatz (Personenjahre)	2007	35,8	20,3	9,0
	2008	32,5	20,1	9,0
	2009	36,3	18,4	6,0

### Aufgaben und Ziele

Die Aufgaben des Themenbereichs *Metrologie in der Chemie, Stoffeigenschaften* umfassen die metrologische Rückführung von chemisch-analytischen Messungen sowie die rückführbare Bestimmung von Gaseigenschaften und -zustandsverhalten sowie von Stoffeigenschaften gemäß des Einheiten- und Zeitgesetzes.

1. Rückführung chemisch-analytischer Messungen (anorganische und organische Chemie mit dem Schwerpunkt „klinische Chemie“) und elektrochemischer Messungen (insbesondere: pH-Wert, Leitfähigkeit). Diese Aufgabe wird im Rahmen eines von der PTB geleiteten nationalen Netzwerks bearbeitet und innerhalb des Konsultativkomitees für die Stoffmenge (CCQM) der Meterkonvention international abgestimmt, wobei weitere internationale Organisationen einbezogen werden, u. a. die World Health Organisation (WHO) und die International Federation for Clinical Chemistry (IFCC).

Die PTB-Forschungstätigkeiten in der klinischen Chemie werden zzt. zum großen Teil durch das European Metrology Research Programme (EMRP) im Rahmen von iMERA-Plus, Targeted Programme „Health“ (TP-Health), auf europäischer Ebene gefördert. Auch für die Arbeitsgebiete Umwelt- und Nahrungsmittelanalytik, Energie und Forensik werden gemeinsam mit den Netzwerkpartnern europäische Kooperationen im Rahmen des EMRP angestrebt.

2. Sicherung der Rückführbarkeit der Messungen von Gaseigenschaften, insbesondere im gesetzlichen Messwesen durch Bauartzulassung von Messgeräten (Kfz-Abgasmessgeräte, Atemalkoholmessgeräte) sowie durch die Bestimmung chemisch-physikalischer Eigenschaften von Gasen, aber auch für die Erschließung und den internationalen Handel mit erneuerbaren Energieträgern. Von besonderer wirtschaftlicher Bedeutung sind hierbei die Gasfeuchte, der Brennwert und das Zustandsverhalten von Erdgasen sowie von Biogas. Ein Forschungsschwerpunkt zur Gasanalytik sowohl für die Metrologie in der klinischen Chemie (siehe 1.) als auch für das gesetzliche Messwesen und die Energie- und Umweltmetrologie wird die Entwicklung neuer Primärverfahren auf spektrometrischer Basis sein.
3. Sicherung der Rückführbarkeit der Messungen chemisch-physikalischer Stoffeigenschaften von Flüssigkeiten und Festkörpern. Diese reichen von der Getreidefeuchte (gesetzliches Messwesen) über die Festkörper- und Flüssigkeitsdichte bis hin zu den Transporteigenschaften von Fluiden und zu kalorischen Größen. Aktuelle Ziele in diesem Bereich sind die gravimetrische Rückführung der Messung kleiner Flussraten, die genaue Bestimmung von Stoffeigenschaften, die für die Grundlagen der Metrologie bedeutsam sind (Neubestimmung der Avogadro-Konstante, Reinheit von Fixpunktmaterialien), sowie die Deckung des aktuellen Bedarfs an chemisch-physikalischen Stoffdaten für Biokraftstoffe.

Im Rahmen der Arbeitsplanbesprechungen sowie im Ergebnis der Evaluierung durch den Wissenschaftsrat 2007 ist der Themenbereich 7 als Bereich mit Ausbaupotential bestimmt worden.

### Gegenwärtige Situation und geplante Arbeiten

#### Zu 1

**Anorganische Analytik:** Es werden primäre elementanalytische Messverfahren für die Bereiche Klinische Chemie, Nahrungsmittel- und Umweltanalytik, insbes. Wasseranalytik, entwickelt und für die Weitergabe bereitgehalten. Einen neuen Schwerpunkt bildet die Speziesanalytik in komplexen Matrices. Dieses Thema wird u. a. im iMERA-Plus-Projekt T2.J10 - „Tracebioactivity“ bearbeitet (z. B. Verfahren zur Bestimmung von Se-Spezies in Blutserum). Die Bestimmung toxischer Metallspezies in Umweltmatrices wird angestrebt. Im Rahmen des iMERA-Plus Projekts T1.J12 - „NAH“ werden höchstgenaue Isotopenverhältnismessungen (Isotopenreinheit von  $^{28}\text{Si}$ ) zur Unterstützung des Avogadro-Projekts durchgeführt. Gemeinsam mit der BAM und einem Industriepartner wird eine Primärbasis für die Elementanalytik (primäre Reinstoffe und Lösungen für die Darstellung und Weitergabe) bereitgestellt und weiter ausgebaut. Weiter werden neue primäre Messverfahren entwickelt, die auf optischer Analytik basieren. Dies ist die oberflächenverstärkte Isotopenverdünnungs-Ramanspektrometrie (ID-SERS), die vor allem für komplexe Analyt/Matrix-Kombinationen besonders in der

klinischen Chemie geeignet ist. Auf der Basis der lasergestützten Infrarot-Spektrometrie werden neue Primärverfahren für die Gasanalytik entwickelt (umweltrelevante Gase, Atemgas im Rahmen des iMERA-Plus Projekts T2.J02 - „Breath Analysis“).

**Organische Analytik:** Schwerpunkt ist die Darstellung der nationalen Normale für Messgrößen der klinischen Chemie (in Abstimmung mit der Deutschen Vereinten Gesellschaft für Klinische Chemie und Laboratoriumsmedizin, DGKL). Ziel ist die Bereitstellung von Bezugspunkten für die in der Anlage 1 der Richtlinie der Bundesärztekammer aufgeführten, rückführbaren Analyte. In diesem Rahmen werden im iMERA-Plus-Projekt T2.J11 - Clinbiotrace“ (Partner: LGC (UK), NPL (UK), IRMM (Geel, EU)) Primärverfahren auf der Grundlage der Isotopenverdünnungs-Massenspektrometrie entwickelt. In Kooperation mit dem NIST, dem LGC und nationalen Forschungspartnern werden darüber hinaus grundlegende Untersuchungen zur Übertragbarkeit der Isotopenverdünnungs-Massenspektrometrie auf die metrologische Quantifizierung von klinisch-relevanten Proteinen durchgeführt. Die Entwicklung von Messverfahren für solche Proteine wird auch in Zukunft einen Schwerpunkt der PTB-Forschung bilden. Gemeinsam mit dem Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit (BVL) wird das Thema Lebensmittelanalytik weiter verfolgt; es wurden erstmals Vergleichsmessungen für die Rückstandsanalytik in Lebensmitteln im Rahmen der Meterkonvention erfolgreich durchgeführt. Im Bereich der Forensik wird in Kooperation mit dem Universitätsklinikum Heidelberg erstmalig ein Primärverfahren für die Messung von illegalen Drogen in Blutserum (delta-9-Tetrahydrocannabinol-THC) beim CCQM vorgestellt.

**Elektrochemie:** Im Vordergrund stehen Entwicklung und Betrieb von primären Messverfahren für pH-Wert und Leitfähigkeit sowie die Zertifizierung von primären Referenzlösungen für Kalibrier- und Prüflaboratorien.

Im Rahmen des iMERA-Plus-Projekts T2.J10 „Tracebioactivity“ werden primäre Verfahren für Ionenaktivitätsmessungen in der klinischen Chemie entwickelt (z. B. Na, K, Ca in Blutserum). Weitere Ziele sind Verfahren für pH-Wert-Messung bei hohen Ionenstärken, für die Umweltanalytik (z. B. Meerwasser), und zur in-line-Prozesskontrolle (internationales Projekt der IUPAC).

#### **Weitere Themen:**

- Rückführung der Leitfähigkeit von hochreinem Wasser auf das SI durch ein neuartiges primäres Messverfahren unter Ausschluss von atmosphärischen Einflüssen. Charakterisierung von Reinstwasser als Referenzlösung für die Messung der elektrolitischen Leitfähigkeit in Produktionsprozessen; diese Rückführung ist in international relevanten Richtlinien für die Pharmaindustrie vorgegeben.
- Aufbau einer analytischen Grundkompetenz für die rückführbare Bestimmung der Zusammensetzung von Biokraftstoffen in Kooperation mit dem LNE (Frankreich) und dem INMETRO (Brasilien) sowie insbesondere mit der BAM. Die Bestimmung der stofflichen Zusammensetzung von Biokraftstoffen bildet die Voraussetzung sowohl für die rückführbare Bestimmung des Energiegehaltes und der Transporteigenschaften dieser Energieträger als auch für deren Herkunftsbestimmung (Sicherung der „sozialen Nachhaltigkeit“).

#### **Zu 2.**

**Gasfeuchte:** Zur Absicherung einer einheitlichen, bisher nur auf Feuchtegeneratoren als Primärnormal basierenden Feuchteskala, soll ein spektrometrisches Normal entwickelt werden (Zweistrahll-Laser-Komparator).

Im Bereich der Spurenfeuchte wird die Anwendung von Permeationsröhrchen als Sekundärnormale untersucht werden, um Feuchtemessungen des Deutschen Wetterdienstes und von DKD-Laboratorien auf das Primärnormal der PTB rückführen zu können.

Parallel zum existierenden coulometrischen Spurenfeuchtegenerator und zu dessen Validierung wird eine gravimetrische Rückführung der Spurenfeuchte erfolgen. Dazu wird eine Magnetschwebewaage mit Durchwägeeinrichtung aufgebaut, mit der die Masseabnahme eines Permeationsröhrchens erfasst wird.

Das Primärnormal für den mittleren und hohen Bereich der Gasfeuchte (thermodynamischer Zwei-Druck-Generator) wird durch einen Generator mit Sättigung über Eis ergänzt werden, mit dem der technisch wichtige Bereich bis ca.  $-60\text{ °C}$  Frostpunktemperatur dargestellt werden kann. Der darstellbare Bereich am oberen Ende der Skala wird bis ca.  $90\text{ °C}$  Taupunktemperatur ausgedehnt werden.

**Abgas- und Partikelkonzentrationsmessung:** In Kooperation mit der Industrie wird die Anwendbarkeit und Zulassungsfähigkeit neuer Messprinzipien und -verfahren für die Dieselrußabgasmessung untersucht, die von wirtschaftlicher Bedeutung für die deutsche Automobilindustrie sind.

**Brennwert und Zustandsverhalten von gasförmigen Energieträgern:** Vor dem Hintergrund steigender Energiepreise muss eine Energieabrechnung mit kleinstmöglicher Unsicherheit ermöglicht werden. Referenzwerte

für den Brennwert reiner Gase, die hierzu benötigt werden, sind derzeit nur mit einer relativen Unsicherheit von 0,12 % bekannt, gefordert werden seitens der Gasversorger 0,05 %.

Geplant sind daher:

- Realisierung der Brennwertbestimmung mit Referenzgaskalorimetern, die in Zusammenarbeit (und mit Förderung) der europäischen Gaswirtschaft entwickelt werden, mit einer Unsicherheit von 0,05 %
- Realisierung einer Referenz-Normdichteapparatur mit einer Unsicherheit  $\leq 0,01$  % zur Umrechnung des massebezogenen auf den in der Gaswirtschaft verwendeten volumenbezogenen Brennwert
- (Beginn der) Entwicklung einer modular aufgebauten Dichte- und Zustands-Normalmessapparatur (mit gemeinsamen Komponenten mit der Referenz-Normdichteapparatur) für gasförmige Energieträger
- die Realisierung gaschromatographischer Erdgasanalysen mit einer Unsicherheit  $\leq 0,2$  %
- Bereitstellung rückgeführter Kalibriergase für Brennwert- und Dichtemessungen sowie für die Gaschromatographie
- Viskositätsmessungen an Gasen (Druck bis 40 bar, Temperatur  $-40$  bis  $200$  °C) mit einer Unsicherheit von 0,1 bis 0,2 % als eine der Voraussetzungen zur Verbesserung der Gasmengenbestimmung

Um die Einspeisung von **Biogasen** in Erdgasnetze zu erleichtern, werden die praktischen messtechnischen Probleme aufgegriffen und eine Anpassung der technischen Regeln und der Regelungen des gesetzlichen Messwesens vorbereitet; u. a. durch Mitwirkung an der Entwicklung einer preislich angemessenen chromatographischen Messtechnik für die Gaszusammensetzung.

### Zu 3

**Getreidemessung:** Zur Verbesserung der „Eichung“ von Getreidefeuchtemessgeräten und zur Vorbereitung der Eichung von Proteinmessgeräten werden Untersuchungen zur Stabilität von vakuumeingeschweißten zertifizierten Getreideproben in Zusammenarbeit mit DLG und BFEL durchgeführt. Weiterhin sollen vorbereitende Arbeiten zur messtechnischen Erfassung des Ölgehaltes von Getreide im Hinblick auf Energiegewinnung aus Getreide durchgeführt werden.

**Festkörperdichte:** Im Zusammenhang mit der Neubestimmung der Avogadro-Konstante und mit Arbeiten zur Neudefinition des Kilogramms muss die relative Messunsicherheit bei der Bestimmung von Dichteunterschieden von Si-Proben unter 0,01 ppm verringert werden. Hierzu sind Weiterentwicklungen der Druck-Flotationsmethode und Vergleichsmessungen (z. B. mit dem NMIJ) vorgesehen.

**Kalorimetrie/Biokraftstoffe:** Brennwert- und Heizwertbestimmung an Biodiesel verschiedener Herkunft sowie ausgewählter Bestandteile von Biodiesel werden zusammen mit genauen Dichte- und Viskositätswerten eine zuverlässige Bestimmung des volumen- und massenbezogenen Energiegehalts erlauben und damit zur korrekten Umsetzung von EU-Richtlinien (2003/30/EC) und nationalen Gesetzen (Biokraftstoffquotengesetz) beitragen.

Die Biokraftstoffaktivitäten werden in Kooperation mit dem LNE (Frankreich), dem INMETRO (Brasilien) und nationalen Partnern durchgeführt. Sie bilden eine untrennbare Einheit mit den o. a. Arbeiten zur Bestimmung der stofflichen Zusammensetzung von Biokraftstoffen.

**Weitere Themen:** Konstruktion und Aufbau einer automatischen hydrostatischen Wägeapparatur für die Dichtebestimmung von Festkörpern.

## Themenbereich 8: Metrologie für die Medizin

Bearbeitet in den Fachbereichen 8.1, 8.2, 8.3		Forschen, Entwickeln	Messen	Beraten
Personaleinsatz (Personenjahre)	2007	50,7	3,0	1,2
	2008	56,9	2,7	1,0
	2009	62,5	2,7	0,9

### Aufgaben und Ziele

Die Aufgaben im Themenbereich *Metrologie für die Medizin* umfassen die Sicherung der Einheitlichkeit des Messwesens in der Heilkunde, die Entwicklung von Normalmessgeräten und Referenzmessverfahren sowie von Verfahren für messtechnische Kontrollen. Diese Aufgaben werden in der Regel in enger Kooperation mit medizinischen Partnern bearbeitet, die in vielen Fällen die relevanten Fragestellungen einbringen und aus klinischer Sicht die Dringlichkeit besser beurteilen und die technischen Entwicklungen besser bewerten können. Es sind dies im Einzelnen:

1. Entwicklung von Verfahren zum bewertenden Vergleich der Messergebnisse der funktionellen Kernspintomographie (fMRI), der Elektro- und Magnet-Encephalographie (EEG und MEG) und der zeitaufgelösten Nahinfrarotspektroskopie (tdNIRS) in der Neurologie.
2. Magnetresonanz-Messverfahren: Entwicklung neuer Messverfahren für die Ultrahochfeld-MRT, Konzepte zur Sicherheitsprüfung von HF-Spulen bei hohen Magnetfeldern, Methoden zur Quantifizierung von in-vivo-Messgrößen mit Hilfe der Kernspinspektroskopie, kernspinpolarisierte Edelgase, NMR und MRI im extrem niedrigen Feld.
3. Entwicklung von bioelektrischen und biomagnetischen Messverfahren, u. a. für die Kardiologie, die Neurologie und für Anwendungen von magnetischen Nano- und Mikropartikeln als Marker.
4. Entwicklung neuer optischer, mikroskopischer und durchflusszytometrischer Messverfahren für die Medizin.
5. Bestimmung von Referenzmesswerten zum Kleinen Blutbild für die externe Qualitätssicherung quantitativer laboratoriumsmedizinischer Ergebnisse, Entwicklung neuer und Verbesserung von bekannten Referenzverfahren.
6. Forschungsarbeiten zum EMRP-Schwerpunktthema „Health“ mit relevanten Themen aus der Medizinphysik, der Chemie, der ionisierenden Strahlung und der Akustik.

Im Rahmen der Arbeitsplanbesprechungen sind die Themenbereiche 7T- und  $\mu$ T-Magnetresonanz (NMR), funktionale Bildgebung, Biomagnetismus und Zytometrie als Forschungsschwerpunkte identifiziert worden.

Weitere Gebiete mit Bezug zur Metrologie in der Medizin werden in anderen Themenbereichen behandelt: Ultraschall (1), Dosimetrie in der Strahlentherapie (4), Klinische Chemie (7) und Temperatur (10).

### Gegenwärtige Situation und geplante Arbeiten

**Zu 1.** Im „Berlin NeuroImaging Center“ hatte die PTB drei von fünf Core-Projekten dieses virtuellen Instituts zur Hirnbildgebung betrieben. Die Förderperiode des BNIC ist 2008 ausgelaufen, ganz im Sinne des fördernden BMBF sind aber aus BNIC-Kooperationen der PTB mit klinischen Partnern neue Projekte erwachsen. Hierzu zählt die fMRI-Studie IMAGEN, ein EU-Projekt, in dem die PTB besonders an der Vergleichbarkeit medizinischer Bilddaten aus verschiedenen Quellen interessiert ist. In einem weiteren BNIC-Nachfolgeprojekt, BMBF-gefördert im Rahmen des Nationalen Deutschen Genom-Netzwerks, sollen an der PTB entwickelte Quantifizierungsverfahren in der MR-Spektroskopie eingesetzt werden.

Ziel der Core-Projekte der PTB im BNIC ist u. a. die Untersuchung der so genannten neurovaskulären Kopplung, d.h. des Zusammenhangs zwischen Hirnaktivität und ihrer Versorgung durch die Blutgefäße.

Die Integration von EEG, MEG und NIRS trägt dazu bei, den zeitlichen Zusammenhang zwischen neuroelektrischer Aktivierung und ihrer vaskulären Versorgung aufzuklären. Dabei war die Nutzung des neuen magnetischen Abschirmraums BMSR-2 der PTB eine Voraussetzung für die Aufzeichnung des MEG in einem kontinuierlichen Frequenzband von 0 Hz bis 1500 Hz.

**Zu 2.** Eine weitere Anwendung der MR-Spektroskopie stellt eine longitudinale Studie zur Bewertung neuer Therapie-Ansätze bei Multipler Sklerose (MS) dar. Dieses 3-T-Projekt leitet unmittelbar über in den MRT-Schwerpunkt der kommenden Jahre, die Entwicklung neuer und möglichst quantitativer Messverfahren für die 7-T-MRT, denn die erste 7-T-Probandenstudie der PTB wird eine MS-Bildgebungsstudie sein.

Bei den 7-T-Aktivitäten wird es zwei Schwerpunkte geben, die parallel bearbeitet werden sollen. Für neurologische Fragestellungen existiert bereits einsatzfähige MRT-Soft- und Hardware, hier stehen Weiterentwicklung und erste Anwendungen in klinischen Studien im Vordergrund. Für den künftigen Schwerpunkt Kardio-MRT hingegen müssen zunächst die Grundlagen erarbeitet werden. Besondere Hoffnungen ruhen hierbei auf dem parallelen Einsatz mehrerer Sendekanäle, einer langjährigen PTB-Spezialität.

Bei den polarisierten Edelgasen in der MRT wird die Entwicklung  $^{129}\text{Xe}$ -basierender Bio-Marker einen Schwerpunkt bilden.

Geradezu entgegen diesem Trend wurden darüber hinaus in der PTB in den letzten Jahren SQUID-Sensoren eingesetzt für die breitbandige NMR in Feldern um  $1\ \mu\text{T}$ . Derart niedrige Felder, die sich in dem magnetischen Abschirmraum BMSR-2 realisieren lassen, erlauben für die Spektroskopie eine äußerst hohe absolute Frequenzauflösung. Für die MR-Bildgebung lassen sie eine Reihe von Optionen zu, die der Hochfeld MRI verschlossen sind, insbesondere die Möglichkeit einer simultanen Messung von MRI und MEG, die in einem Verbundvorhaben mit Europäischen Partnern im Rahmen des 7. Rahmenprogramms der EU entwickelt werden soll. Darüber hinaus wird in dem vom BMBF geförderten „Bernsteinzentrum für Neurotechnologie“ untersucht, ob die durch neuronale Ströme hervorgerufene Verschiebung der Larmorfrequenz im niedrigen Feld direkt für die Bildgebung genutzt werden kann.

**Zu 3.** Im Rahmen eines Kooperationsvertrags mit der Firma Biomagnetic Park wird ein Kliniklabor in der Charité Campus Benjamin Franklin gemeinsam genutzt, um die Magnetkardiografie in der klinischen Routinediagnostik zu etablieren. Neurologische Anwendungen der bioelektrischen und biomagnetischen Messtechnik werden in zahlreichen Kooperationen innerhalb und außerhalb des Berlin NeuroImaging Centers entwickelt.

Für die Gastroenterologie und die Pharmakokinetik wurde das „Magnetic Marker Monitoring (MMM)“ entwickelt. Indem eine Arzneiform mit magnetischen Mikropartikeln versehen und vor der Einnahme magnetisiert wird, kann MMM ihren Weg und ihre Auflösung im Magen-Darm-Trakt verfolgen. Diese Arbeiten werden im Rahmen einer Kooperationsvereinbarung mit der Firma Socratec R&D durchgeführt, die mit den Messeinrichtungen der PTB die MMM-Technik zur Erprobung von Arzneiformen einsetzt.

Magnetische Nanopartikel werden genutzt, um biochemische Bindungsreaktionen zu untersuchen. Hierzu wurde in der PTB die Methode der Magnetrelaxometrie entwickelt. In einigen neuen Ansätzen der Krebsbehandlung werden heute magnetische Nanopartikel zur Fokussierung der Therapie auf den Tumor eingesetzt. Hier kann die Magnetrelaxometrie quantitative Informationen zur Anreicherung der magnetischen Nanopartikel liefern. In einer Reihe von Drittmittelprojekten, die von der DFG und dem BMBF gefördert werden, wird dieses Potential der Methode ausgelotet.

**Zu 4.** Die Schwerpunkte der Arbeiten zur Gewebeoptik und der molekularen Bildgebung liegen derzeit bei der Fluoreszenz-Bildgebung der Permeabilität der Mikrovaskulatur von Tumoren sowie in der Nahinfrarot-Bildgebung und -Spektroskopie des Gehirns. Insbesondere für die Fluoreszenz-gestützte funktionelle und die molekulare Bildgebung stellt sich neben den messtechnisch-praktischen Anforderungen nach hinreichend empfindlichen Messverfahren auch die Frage, ob sich bestimmte Krankheitsbilder quantitativ mit funktionellen Veränderungen oder mit molekularen Targets korrelieren lassen.

Eine weitere Zielrichtung der methodischen und instrumentellen Entwicklungsarbeiten stellen nicht-invasive Messverfahren zur Bestimmung (von Änderungen) der Hämoglobinkonzentration und der Sauerstoffsättigung von Gewebe sowie Gewebep erfusionsmessungen mit Hilfe optischer Kontrastmittel dar.

**Zu 5.** Zur Bestimmung von Referenzwerten für das Kleine Blutbild sowie zur Entwicklung von Referenzmessverfahren für die Laboratoriumsmedizin werden Forschungsarbeiten auf den Gebieten der Fluoreszenz- und Polarisations-Durchflusszytometrie sowie der quantitativen Laser-Scanning-Fluoreszenzmikroskopie durchgeführt.

Angesichts der zunehmenden Bedeutung der molekularen und zellulären Medizin werden weiterhin ausgewählte (Mess-) Methoden, die in diesem Bereich eingesetzt werden, exploratorisch auf ihre Genauigkeit und Grenzen hin untersucht (z. B. quantitative Polymerase-Kettenreaktion, qPCR oder Enzyme Linked Immunoassays, ELISA) .

**Zu 6.** Die PTB ist im Gemeinsamen Forschungsprojekt „Traceable measurement of field strength and SAR for the Physical Agents Directive“ (EMF and SAR) des EMRP mit einem Teilprojekt vertreten. Die in der Gruppe angewandten MRT-Techniken zur Bildgebung elektromagnetischer Feldverteilungen sollen zusammen mit den Projektpartnern zu einem rückführbaren Messverfahren weiterentwickelt werden.

Im Rahmen des EMRP-Verbundvorhabens „Metrology on a Cellular Scale for Regenerative Medicine“ (Regenmed) werden zusammen mit Partnern aus England (NPL, LGC) und Italien (INRIM) Forschungsarbeiten zur Entwicklung und Erprobung von Messverfahren und Standards für die Qualitätssicherung bei der Herstellung künstlichen Gewebes (tissue engineering) in der regenerativen Medizin durchgeführt. Dies umfasst seitens der PTB durchflusszytometrische Mess- und Sortierverfahren zur Charakterisierung und Anreicherung von (Stamm-) Zellen sowie mikroskopische Messverfahren zur 3D-Charakterisierung des Zellwachstums und der Funktion der gezüchteten Zellverbände oder des Gewebes.

## Themenbereich 9: Radiometrie und Photometrie

Bearbeitet in den Fachbereichen 4.1, 4.5, 7.1, 7.2, 7.3(45%)		Forschen, Entwickeln	Messen	Beraten
Personaleinsatz (Personenjahre)	2007	70,4	12,0	3,6
	2008	75,6	10,0	3,5
	2009	85,9	9,0	2,6

### Aufgaben und Ziele

Radiometrie und Photometrie sind auf Grund der Stellung der PTB in Europa, des Gewichtes der einschlägigen Industrie, der getätigten Investitionen (Messeinrichtungen im neuen Albert-Einstein-Bau und Speicherring „Metrology Light Source“ (MLS) im Willy-Wien-Laboratorium der PTB in Berlin-Adlershof) und der Bestätigung im Rahmen der Aufgabendiskussion „2016“ auch zukünftig ein Schwerpunkt der PTB. Die Aufgaben, Forschungs- und Entwicklungsziele ergeben sich direkt aus den gesetzlichen und satzungsgemäßen Aufgaben der PTB und der Bedeutung für die nationale und europäische Industrie und Gesellschaft:

1. Empfänger- und strahlergestützte Photometrie, Colorimetrie und Spektroradiometrie mit verringerter Messunsicherheit insbesondere für neuartige schmalbandige Lichtquellen und Photovoltaik. Grundlegende Untersuchungen auf dem Gebiet der Einzelphotonenquellen und -detektoren.
2. Entwicklung neuartiger Messtechnik und Messverfahren sowie die Rückführung ihrer Messergebnisse für innovative Licht- und Strahlungsquellen sowie von Verfahren und Messplätzen zur Charakterisierung und Kalibrierung von bildgebender Licht- und Strahlungsmesstechnik. Dazu gehört die Weiterentwicklung der Photometrie und angewandten Radiometrie zur vereinfachten und kostengünstigen Weitergabe der Einheiten an industrielle Nutzer mit angemessener Unsicherheit.
3. Detektorgestützte Radiometrie im Wellenlängenbereich oberhalb 200 nm auf der Basis spektral aufgelöster Strahlungsleistungsmessungen mit Strahlungsempfänger-Primärnormalen als metrologische Grundlage für die meisten Anwendungsgebiete der Radiometrie, insbesondere für die Photometrie und die Absolut-Strahlungsthermometrie.
4. Nutzung von Synchrotronstrahlung im THz-, IR-, UV-, VUV-, EUV- und Röntgenbereich zur Bearbeitung grundlegender und angewandter metrologischer Aufgaben mit den Schwerpunkten Radiometrie, Spektrometrie und Nanometrologie.
5. Reflektometrie und Spektrometrie mit verringerten Messunsicherheiten, insbesondere für neuartige Strukturen und funktionale Oberflächen. Messung der Transmission sowie der gerichteten und diffusen Reflexion für die industrielle Messtechnik, Fertigung und Qualitätssicherung.

Im Rahmen der Arbeitsplanung ist das Gebiet der Radiometrie und Photometrie mit Schwerpunkt Synchrotronstrahlung als Bereich mit Ausbaupotential bestimmt worden.

### Gegenwärtige Situation und geplante Arbeiten

**Zu 1.** Grundlage der Photometrie ist die SI-Basiseinheit Candela. Zur Realisierung der darauf aufbauenden anderen photometrischen Einheiten mit verringerter Messunsicherheit und zur Verbesserung der Bewahrung und Weitergabe der spektralen und photometrischen Empfindlichkeit, der spektralen Bestrahlungsstärke und Strahldichte werden die vorhandenen Messplätze gezielt weiterentwickelt. Die spektrale Bestrahlungsstärke stützt sich dabei auf verschiedene neu entwickelte Messplätze der strahlergestützten Spektroradiometrie. Für die Verbesserung besonders im UV-Spektralbereich wurde als primäres Strahlernormal ein Hochtemperatur-Hohlraumstrahler der dritten Generation umfassend charakterisiert, der noch weiter optimiert werden muss.

Mit dem Schwerpunkt „Ungefilterte Empfänger und Solarzellen“ wird der Messplatz zur Bestimmung der „differenziellen spektralen Empfindlichkeit“ den Erfordernissen für die Charakterisierung organischer Solarzellen und Multijunction-Zellen angepasst und erweitert. Aufgrund der führenden Stellung der PTB und des zunehmenden Engagements vieler Metrologieinstitute im Bereich photovoltaischer Messtechnik wird ein internationaler Schlüsselvergleich mit der PTB als Pilotlabor angestrebt. Freiluft-Messmöglichkeiten sollen den Transfer zum Nutzer und anderen internationalen Messeinrichtungen sicherstellen. Insbesondere für die Rückführung und Kalibrierung gefilterter Empfänger wird der Messplatz für durchstimmbare Laser in der Photometrie um einen Strahlengang mit Quasi-Dauerstrich-Lasern ergänzt, so dass eine lückenlose Kalibrierung von Empfängern für hohe Bestrahlungsstärke und Strahldichte im Spektralbereich von 230 nm bis 3µm ermöglicht wird.

Das Arbeitsgebiet „Einzelphotonenquellen“ wird in den nächsten Jahren weiter ausgebaut werden. Die Eignung dieser Quellen für die Radiometrie kleiner Photonenflüsse wird untersucht in Hinblick auf (i) eine mögliche Realisierung eines Quantenstandards für Strahlungsleistung und (ii) für die Kalibrierung von Einzelphotonendetektoren. In Eigenarbeit und mittels Kooperationen sollen Einzelphotonenquellen hoher Güte, hoher Photonenrate und hoher Stabilität aufgebaut werden.

**Zu 2.** Für die Bereiche der Metrologie, die in höchstem Maße sowohl für die Wirtschaft als auch für die Gesellschaft von Interesse sind, werden ausgewiesene Gebiete der Photometrie und angewandten Radiometrie neu- und weiterentwickelt. Die Kalibrierung und Charakterisierung innovativer Strahlungs- und Signalquellen einschließlich UV-Strahler, Halbleiterstrahler, Hochleistungslaser und Displays stellen hierbei besondere Anforderungen an die photometrische und radiometrische Messtechnik.

Nach Abschluss des Testbetriebs des neuen Roboter-Goniophotometers einschließlich der Realisierung der Lichtstromeinheit Lumen und seiner erfolgreichen Validierung im Rahmen des Qualitätsmanagementsystems (QM) wird diese Realisierung durch den Lichtstrom-Vergleich in der regionalen Metrologieorganisation EURAMET (EUROMET.PR-K4) verifiziert. Weitere Schwerpunkte sind die Weiterentwicklung der Photometrie und Colorimetrie für den Einsatz moderner Licht- und Signalquellen, insbesondere für LEDs und OLEDs und die hierfür notwendige Charakterisierung und Kalibrierung von Array-Spektrometern. Ein wichtiges Ziel ist in diesem Zusammenhang die Rückführung von Messergebnissen der kameragestützten Photometrie und Radiometrie. Der Ausbau des Kalibrierangebotes in der Hochleistungslaserradiometrie und der optischen Nachrichtentechnik sowie die Weiterentwicklung und Aufbau einer Messtechnik für hohe UV-Bestrahlungsstärken bzw. UV-Dosen sind weitere Arbeitsschwerpunkte. In der LED-Photometrie/Colorimetrie steht der Abschluss des internationalen „APMP LED-Supplementary comparison“ (APMP.PR-S3) bevor, an der die PTB als Teilnehmer beteiligt ist.

Mit dem Eintritt in die Messtechnik für hohe UV-Bestrahlungsstärken und -dosen werden für dieses immer stärker nachgefragte Gebiet der angewandten Radiometrie in der PTB neue Kalibrier- und Messmöglichkeiten geschaffen, mit denen auch materialoptische Forschungsarbeiten unterstützt werden sollen. Ein Messplatz zur Kalibrierung von (Linien-) Strahlern mit hoher UV-Bestrahlungsstärke wird weiterentwickelt. Ein Messplatz zur differentiellen spektralen Empfindlichkeit für UV-Empfänger ist in Vorbereitung.

Ein Schwerpunkt der nächsten Jahre wird die Realisierung einer rückgeführten kameragestützten Photometrie und Radiometrie sein. Dementsprechend werden neue Messverfahren und Messplätze entwickelt, die bei einer Reduzierung von Messunsicherheiten eine Reduzierung des Personaleinsatzes durch Automation erlauben. Diese Ausrichtung der Photometrie und angewandten Radiometrie ist eine notwendige Voraussetzung dafür, dass auch weiterhin kontinuierlich Drittmittel eingeworben und Industriekooperationen eingegangen werden können.

In der Hochleistungslaserradiometrie, die zur Zeit den Wellenlängenbereich von 193 nm bis 10,6 µm (Dauerstrichlaser und gepulste Laser) bis zu Strahlungsleistungen von 1,5 kW abdeckt, wird in den nächsten Jahren das Kalibrierangebot erweitert und den geänderten Anforderungen der Hersteller und Anwender angepasst werden. Messplätze für die Kalibrierung von Laserleistungsmessgeräten für Diodenlaser wurden aufgebaut bzw. befinden sich im Aufbau, ihre Validierung und die Erstellung der nötigen QM-Dokumentation wird abgeschlossen. Der RMO-Vergleich (EUROMET.PR-S2) über die Strahlungsleistung von Hochleistungslasern steht kurz vor dem Abschluss, ein weiterer Vergleich über Strahlungsleistungen von 100 W und 1000 W ist in Planung. Auch hier wird die PTB Pilotlabor sein. In der optischen Nachrichtentechnik sind die Ziele der kommenden Jahre die Verringerung der Messunsicherheit in der Leistungsmessung und die Implementierung der faseroptischen Nichtlinearitätsmessung bei hohen Leistungen in das Leistungsangebot, beides insbesondere in Hinblick auf die Verbesserung des Leistungsangebotes für die DKD-Laboratorien.

**Zu 3.** Damit die PTB ihre durch zahlreiche Vergleichsmessungen belegte internationale Spitzenstellung auf den wirtschaftlich bedeutenden Anwendungsgebieten der Radiometrie halten und nach Möglichkeit ausbauen kann, müssen die Detektor-Primärnormale, die an der Spitze der Kalibrier- bzw. Rückführungskette stehen, zuverlässige Messungen auf aktuell höchstem metrologischem Niveau ermöglichen. Besonders hohe Anforderungen in einem breiten Wellenlängenbereich stellt dabei die radiometrische Bestimmung thermodynamischer Temperaturen auf Grundlage des Planckschen Strahlungsgesetzes (Absolut-Strahlungsthermometrie). Die PTB bestimmt derzeit im Rahmen internationaler Kooperationen die thermodynamischen Temperaturen neuartiger Hochtemperatur-Fixpunkte mit möglichst geringer Unsicherheit für eine mittelfristig verbesserte und erweiterte „praktische“ Internationale Temperaturskala (siehe auch TB 10, Pkt. 1). Dazu wurde der Aufbau eines neuen, weitgehend automatisierten Messplatzes für die hochgenaue Kalibrierung von Detektor-Sekundärnormalen zur Weitergabe der Skala der spektralen Empfindlichkeit begonnen. Dieser Messplatz wird die Kalibrierung von Strahlungsempfängern mit relativen Unsicherheiten von kleiner als  $10^{-5}$  ermöglichen und damit im Rahmen des iMERA-Plus-Forschungsvorhabens „Candela: Towards quantum-based photon standards“ (qu-Candela) über die Charakterisierung von ausgesuchten Siliziumdioden als „Predictable Photon Detectors“ zur Verknüpfung der klassischen Radiometrie mit der Photonenradiometrie wesentlich beitragen.

Eine verbesserte Realisierung der Skala der spektralen Empfindlichkeit ist auch im IR-Spektralbereich in Bearbeitung, der insbesondere für die optische Nachrichtentechnik bei 1300 nm und 1550 nm und die Niedertemperatur-Strahlungsthermometrie von Bedeutung ist.

Über den internationalen Stand der Detektorradiometrie im UV-Spektralgebiet wird der von der PTB als Pilotlabor geführte „Key Comparison“ CCPR-K2.c Auskunft geben, für den jetzt die Auswertung und die Erstellung und Abstimmung des Abschlussberichts begonnen hat. Die vorhandenen Messmöglichkeiten werden auch zur Charakterisierung von Strahlungsempfängern eingesetzt, um dem schweizerischen PMOD/WRC den Einsatz geeigneter UV-Filterradiometer für satellitengestützte Messungen der solaren UV-Strahlung zu ermöglichen.

Eine umfangreiche zukunftsweisende Aufgabenstellung ergibt sich schließlich daraus, dass die PTB jüngst im Rahmen ihrer strategischen Planung das Themengebiet „(Sub-)THz und IR“ als einen Schwerpunkt identifiziert hat. In dem aus optischer Sicht extrem langwelligen THz-Spektralbereich sind verlässliche rückgeführte Strahlungsleistungsmessungen bisher gar nicht möglich. In einem ersten Schritt wurden deshalb eine Demonstrationsmessung mit dem vorhandenen, für den IR-Bereich eingesetzten Detektor-Primärnormal durchgeführt und die verschiedenen Unsicherheitsbeiträge abgeschätzt. Auf dieser Grundlage erfolgt nun der Aufbau einer Detektorkalibrierung im THz-Spektralbereich, die insbesondere auf die Möglichkeiten abzustimmen ist, die in absehbarer Zeit die IR- und THz-Strahlungserzeugung an der MLS im Willy-Wien-Laboratorium der PTB bieten wird.

**Zu 4.** Die PTB betreibt bei BESSY II ein international anerkanntes Laboratorium für Metrologie mit Synchrotronstrahlung im Röntgenbereich und baut z. Zt. an der MLS Strahlrohre und Messplätze auf, die den Bereich von THz- bis zur weichen Röntgenstrahlung abdecken. Aufgabenschwerpunkte sind:

- die Realisierung radiometrischer Einheiten auf der Basis der nach Schwinger berechenbaren primären Strahlernormale BESSY II und MLS und mit Kryoradiometern als primären Empfängernormalen,
- die Charakterisierung und Kalibrierung von Strahlungsquellen und Detektoren,
- die Charakterisierung optischer Komponenten und Baugruppen, insbesondere auch für die Entwicklung der EUV-Lithographie,
- die Bestimmung von Schichtdicken im nm-Bereich durch Röntgenreflektometrie,
- die Messung von Nanopartikelgrößen über Röntgenkleinwinkelstreuung und
- die Entwicklung und Anwendung der referenzprobenfreien Röntgenfluoreszenzanalyse.

Neben der Erledigung von Basis-Kalibrieraufgaben liegen Schwerpunkte der Arbeiten in der Erfüllung umfangreicher vertraglicher Verpflichtungen gegenüber Industrieunternehmen und Forschungseinrichtungen, insbesondere zur Entwicklung der Mikroelektronik und der EUV-Lithographie. Daneben wird die Röntgenreflektometrie zur Schichtdickenbestimmung von SiO<sub>2</sub>-Filmen auf Si eingesetzt werden, auch an der Siliziumkugel im Rahmen des internationalen Avogadro-Projekts (siehe TB 6, Pkt. 1).

Geplant ist, an der MLS weitere Strahlrohre und Messplätze zur Nutzung der Synchrotronstrahlung vom THz- bis in den EUV-Bereich aufzubauen. BESSY II wird dagegen für die Metrologie im Röntgenbereich genutzt. Dabei begleitet die PTB auch die Entwicklung und Anwendung neuartiger gepulster Röntgenquellen.

**Zu 5.** Optische Komponenten wie optische Filter, hochreflektierende Spiegel, funktionale Oberflächen und Strukturen gewinnen zunehmend an Bedeutung in der Messtechnik, der industriellen Fertigung und der Qualitätssicherung. Dafür werden neue, moderne Messplätze und -methoden für die Messung kleinerer Strukturen mit höherer spektraler und räumlicher Auflösung entwickelt. Neben so genannten „harten“ Messgrößen spielen zukünftig auch immer mehr „weiche“ Eigenschaften von Oberflächen und Strukturen, hierbei insbesondere ihr optisches Erscheinungsbild („Appearance“), eine größere Rolle. Ein Schwerpunkt der Reflektometrie werden daher Multigeometriecharakterisierungen von Oberflächen und Strukturen sein, d. h. die Messung der dreidimensionalen Strahldichteverteilung für beliebige Einstrahlrichtungen.

Zur ständigen Verbesserung der Qualität im Dienstleistungsbereich werden in den nächsten Jahren eine Reihe von Vergleichsmessungen durchgeführt. So wird die PTB am CCPR-K6 (Spektraler Transmissionsgrad) und an einer Reihe von bilateralen Vergleichen, wie z. B. mit dem NIST im Bereich der diffusen Reflexion, teilnehmen.

Die zur Verbesserung und Dokumentation weltweiter internationaler Äquivalenz durchgeführten internationalen Vergleichsmessungen, bei denen die PTB in starkem Maße als Pilotlabor agiert, binden erhebliche Ressourcen. Dies gilt auch für die aktive Mitarbeit in nationalen und internationalen Gremien wie CIE, CEN, ISO, etc. Nur so können in einem stark normativ geprägten Arbeitsgebiet wie z. B. der Photometrie Randbedingungen geschaffen werden, die für die deutsche und europäische Industrie adäquat sind.

## Themenbereich 10: Thermometrie

Bearbeitet in den Fachbereichen* 7.3 (55%), 7.4, 7.5 (65%), 7.6 (50%), 1.7 (15%)		Forschen, Entwickeln	Messen	Beraten
Personaleinsatz (Personenjahre)	2007	37,4	14,6	5,5
	2008	39,9	14,2	4,3
	2009	40,1	14,4	3,5

### Aufgaben und Ziele

Im Themenbereich 10 „Thermometrie“ ist die Verantwortung für die Darstellung, Bewahrung und Weitergabe der internationalen Temperaturskalen, für die thermophysikalischen Einheiten und für die nationalen Normale für die thermische Energie zusammengefasst. Die gesetzlichen Grundlagen dafür stehen im Einheiten- und Zeitgesetz, im Eichgesetz, in der Europäischen Messgeräte-Richtlinie (MID) 2004/22/EG und, was die medizinischen Thermometer angeht, im Medizinproduktegesetz. Die Ziele und Aufgaben des Themenbereichs lassen sich in sechs Hauptpunkte untergliedern:

1. Darstellung und Weitergabe der internationalen Temperaturskalen ITS-90 und PLTS-2000 auf höchstem metrologischen Niveau einschließlich der dazu notwendigen Forschung und Entwicklung von verbesserten Messverfahren und praktisch handhabbaren Thermometern insbesondere auch im Bereich sehr tiefer und sehr hoher Temperaturen.
2. „Absolute“ Thermometrie zur Messung der thermodynamischen Temperatur nach primären Verfahren mit dem Ziel einer verbesserten Übereinstimmung der genannten Skalen mit der thermodynamischen Temperatur und einer künftigen Neudefinition der SI-Basiseinheit Kelvin durch Festlegung einer Fundamentalkonstante.
3. Darstellung und Weitergabe der Skala für die thermische Energie sowie Technologietransfer an die Industrie im Rahmen eines europäischen Kompetenzzentrums.
4. Darstellung und Weitergabe der Skalen für die Wärmeleitfähigkeit und die Temperaturleitfähigkeit sowie Weitergabe der Skala für die volumetrische spezifische Wärme.
5. Entwicklung und Verbesserung von Standardmessverfahren für thermophysikalische Stoffgrößen in weiten Zustandsbereichen von Temperatur und Druck einschließlich des Technologietransfers an die Industrie.
6. Kalibrierung und Prüfung von Thermometern, Filterradiometern, Thermographiekameras, Wärme- und Kältezählern sowie Messeinrichtungen für Emissionsgrad, Wärmeleitfähigkeit, Temperaturleitfähigkeit und Wärmekapazität.
7. Maßgebliche Mitarbeit in nationalen und internationalen metrologischen und normativen Gremien und den zugehörigen Arbeitsgruppen (Meterkonvention, CCT, CCU, CODATA, EURAMET, COOMET, OIML, CEN, WELMEC, ISO, IEC, DIN, DKD, VDI, DIBt u. a.) sowie führende Beteiligung beim Betrieb eines Informations- und Datenbanksystems für thermische Metrologie (evitherm).

### Gegenwärtige Situation und geplante Arbeiten

**Zu 1.** Die letzte Revision der internationalen Temperaturskala wurde vor knapp 20 Jahren vorgenommen. Die zwischenzeitlich aufgedeckten Abweichungen von der thermodynamischen Temperatur, u. a. bei den Temperaturwerten der Fixpunkte, sind in eine Neudefinition der ITS einzuarbeiten, die auf einer Reihe internationaler Tagungen mit maßgeblichen Beiträgen der PTB bereits diskutiert wird. Dafür muss z. B. der Einfluss von Restverunreinigungen auf die Erstarrungstemperaturen von Fixpunktmaterialien untersucht und durch Verbesserung der Fixpunktzellen in Europa eine echte Konkurrenzfähigkeit mit dem hierin führenden Laboratorium beim NIST (National Institute of Standards and Technology, USA) erreicht werden. Mit diesem Ziel gibt es intensive Kooperationen innerhalb der PTB, mit der BAM und einigen Hochschulinstituten.

Für den Temperaturbereich oberhalb der bisherigen Fixpunkte der ITS-90 zwischen 1100 °C und 3000 °C wurden in einer weltweiten (in Europa EU-geförderten) Zusammenarbeit neuartige Fixpunkte aus Metall-Kohlenstoff-Eutektika entwickelt, deren thermodynamische Temperaturen gegenwärtig im Rahmen eines EURAMET-

\* In geringem Umfang wird das Themengebiet auch in Fachbereich 3.3 behandelt.

Kooperationsprojekts (EURAMET project 926 „High-Temperature Fixed-Points for Future Temperature Scale“ und CCT „High-Temperature Fixed-Points Research Plan“) bestimmt werden (siehe auch TB 9, Pkt 3). Die PTB leistet hierfür einen wesentlichen Beitrag ebenso wie für die Entwicklung neuartiger zur Interpolation in diesem Temperaturbereich einsetzbarer Thermolemente. Für den direkten Vergleich berührungsthermometrischer und strahlungsthermometrischer Untersuchungen ist die PTB derzeit durch eigene patentierte Zellenentwicklungen gut gerüstet.

Bei der Strahlungsthermometrie wurde ein Messplatz mit reduziertem Strahlungshintergrund in Betrieb genommen, der den messbaren Temperaturbereich bis zu  $-170\text{ °C}$  ausdehnt und Messungen unter Vakuum (u. a. für Weltraumanwendungen) erlaubt. Damit sind für Europa einmalige Mess- und Kalibriermöglichkeiten mit niedrigem Strahlungshintergrund u. a. für die satellitengestützte Infrarotfernerkundung und für die industrielle Prozesssteuerung im Vakuum sowie für die Emissionsgradmessung bereitgestellt worden, die jetzt in Kooperation mit deutschen Industrieunternehmen und Forschungseinrichtungen aus dem Bereich der Weltraumforschung und der berührungslosen Temperaturmessung genutzt werden.

Im Überlappungsbereich zwischen den Skalen ITS-90 und PLTS-2000 im Temperaturbereich um 1 K ist die direkte Untersuchung der Unterschiede zwischen den Skalenträgern ( $^3\text{He}$ -Schmelzdruck für die PLTS-2000 und Helium-Dampfdruck bzw. Gasthermometrie für die ITS-90) abgeschlossen und in Form der neuen Skala PTB-2006 dokumentiert. Nachdem der Anschluss der PLTS-2000 an die ITS-90 nunmehr geklärt ist, können beide Skalen in einer einheitlichen internationalen Temperaturskala zusammengefasst werden.

Für Temperaturen unterhalb von 1 K bis in den Mikrokkelvinbereich ist die Entwicklungsfähigkeit von gängigen Thermometern zu künftigen Skalenträgern zu prüfen. Ferner sind die verschiedenen Methoden (z. B. magnetische Thermometer, Kapazitätsglasthermometer, SQUID-Rauschthermometer) mit metrologischer Qualität vergleichend zu untersuchen und dabei ihre Fehlerquellen zu analysieren und zu beseitigen. Außerdem werden für die praktische Thermometrie in diesem Temperaturbereich neuartige Magnetfeld-Fluktuationsthermometer und Stromrauschthermometer entwickelt. Die PTB beteiligt sich in diesem Zusammenhang an einem von der EU geförderten Vorhaben „European Microkelvin Collaboration“ mit 12 weiteren europäischen Partnern, das im April 2009 beginnt. Zusätzliche Herausforderungen sind die Messung sehr tiefer Temperaturen in hohen Magnetfeldern und die Temperaturmessung in kleinen Dimensionen mit höchster Auflösung, einem Parametergebiet, in dem man neuartige Quanteneffekte erwarten kann, die auch für die Thermometrie relevant sind. Bei der in diesem Temperaturbereich eingesetzten SQUID-basierten Verstärker- und Ausleseelektronik hat die PTB eine weltweit führende Position.

Die PTB untermauert ihren Anspruch als weltweit führendes Zentrum für Temperaturmessung nicht nur durch höchste metrologische Qualität, sondern auch durch die Breite des bearbeiteten Temperaturbereichs (von  $0,000025\text{ K}$  bis  $3500\text{ K}$ ). Dieser Anspruch wird unterstrichen z. B. durch die starke internationale Nachfrage nach der iMERA special facility „Primary Temperature Radiators“ (PriTeRa), durch die Übernahme von Kalibrierdienstleistungen vom britischen Staatsinstitut NPL (National Physical Laboratory) und durch das Angebot kompletter Systemlösungen für die Thermometrie aus einer Hand.

**Zu 2.** Durch eine Verringerung der Messunsicherheit in der Gasthermometrie (DCGT) im Bereich tiefer Temperaturen um eine Größenordnung und die Ausdehnung dieses Messverfahrens bis zum Tripelpunkt des Wassers wird derzeit im Rahmen eines internationalen iMERA-Plus-Kooperationsprojekts die Unsicherheit des Wertes der Boltzmann-Konstante verbessert. Ziel ist die Neudefinition des Kelvin. Die bisherige auf einer Materialeigenschaft des Wassers beruhende Definition soll durch die Verknüpfung mit der thermischen Energie  $kT$  mittels Festlegung des Werts der Boltzmann-Konstante  $k$  abgelöst werden (wie bei der Meterdefinition durch Festlegung der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum bereits geschehen). Die Verabschiedung der Neudefinition ist auf der alle vier Jahre stattfindenden Generalkonferenz für Maß und Gewicht (CGPM) im Jahr 2011 zusammen mit der Neudefinition von Kilogramm, Mol und Ampere geplant.

Der Einsatzbereich der Infrarot-Absolut-Strahlungsthermometrie, die bisher nur im Bereich oberhalb des Zink-Fixpunktes ( $419\text{ °C}$ ) genutzt wurde, soll erweitert werden, weil die Vorteile dieser Messmethode (berührungsfreie Messung, Messung aus der Distanz z. B. aus dem Orbit, Messung bewegter Objekte) auch für tiefere Temperaturen und größere Wellenlängen erschlossen werden sollen (u. a. Überwachung von Klimaveränderungen).

**Zu 3.** Die PTB hat in den letzten Jahren in Europa einmalige Messmöglichkeiten für die thermische Energie im Bereich der Fernwärme- und Fernkälteversorgung neu aufgebaut. Diese Normalanlagen für Durchflüsse von Wasser bis zu  $1000\text{ m}^3/\text{h}$  und Temperaturen von  $3\text{ °C}$  bis  $90\text{ °C}$  mit einer relativen Unsicherheit von  $4 \cdot 10^{-4}$  werden gegenwärtig durch den Aufbau einer Messanlage für Wassertemperaturen bis  $230\text{ °C}$  ergänzt, mit der das neue Arbeitsgebiet „Messung thermischer Energie in Kraftwerken“ erschlossen wird. Hierbei ist das Ziel, die Unsicherheit der Messungen in Kraftwerken durch verbesserte Rückführung um einen Faktor 5 zu reduzieren und damit dort eine präzisere Steuerung zu ermöglichen. Auf diese Weise wird eine Steigerung der Kraftwerkseffizienz im Pro-

zentbereich erwartet. Parallel dazu läuft eine ansteigende Zahl von drittmittelfinanzierten Forschungsk Kooperationen mit renommierten Herstellern von Wärmemengenzählern und Durchflussmessgeräten auf dem Gebiet der Laser- und Ultraschallmesstechnik.

Im Bereich des gesetzlichen Messwesens führt die PTB 80% aller Bauartzulassungen bzw. Konformitätsbewertungen für Wärmemessgeräte in Europa durch. Sie war auch wesentlich an der Gründung eines europäischen Fachverbands der Energieversorger, Wärmezählerhersteller, Abrechnungsunternehmen und metrologischen Institutionen (EMATEM) beteiligt und spielt dort eine führende Rolle.

**Zu 4.** Für die Wärmeleitfähigkeit, die Temperaturleitfähigkeit sowie für die Wärmekapazität und für den spektralen Emissionsgrad werden verbesserte Normalmesseinrichtungen mit dem Ziel einer deutlichen Reduzierung der Messzeit und bei gleichzeitiger Verringerung der Unsicherheit entwickelt. In Kooperationen mit Universitätsinstituten und der Industrie werden an diesen Anlagen z. B. Vergleichsmessungen zur Temperaturleitfähigkeit und Wärmeleitfähigkeit an Nano-Fluiden und die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit feuchtebeladener Bau- und Dämmstoffe durchgeführt. Eine neue Stoßrichtung der PTB in diesem Arbeitsgebiet richtet sich mittelfristig auf die Erweiterung der Messmöglichkeiten zu Temperaturen bis 2000 °C u. a für die Materialcharakterisierung für Fusionsreaktoren.

**Zu 5.** Die erreichte hohe Leistungsfähigkeit bei der Bestimmung thermophysikalischer Eigenschaften von Materialien zeigt sich u. a. in der Erteilung zahlreicher Patente und der Vergabe einer Reihe von Lizenzen an Messgeräthehersteller in Europa. Die begonnenen Entwicklungen zur Wärmeleitfähigkeitsmessung bei hohen Temperaturen werden abteilungsübergreifend weitergeführt.

**Zu 6.** Die Kalibrier- und Prüfmöglichkeiten für Temperatursensoren, Fixpunktzellen und Normalproben in der Berührungsthermometrie, für Filtradiometer, Strahlungsthermometer, Thermographiekameras, Hohlraumstrahler und Wolframbandlampen in der Strahlungsthermometrie, zur Zertifizierung von medizinischen Thermometern und zur Konformitätsbestätigung von Wärme- und Kältezählern sowie von Messgeräten für thermische Transportgrößen sind auf dem erforderlichen Stand der Forschung und Technik zu halten und die Kalibrierungen und Prüfungen im Sinne der Kunden so rationell und kostengünstig wie möglich durchzuführen. Insbesondere werden Kalibriermöglichkeiten verstärkt für bildgebende Thermographiekameras und für Hochtemperatur-Thermoelemente entwickelt, um die steigende Nachfrage aus Industrie und Forschung zu decken. Dies ist eine wichtige Daueraufgabe mit hoher und weiter wachsender wirtschaftlicher Bedeutung.

**Zu 7.** Eine wichtige Aufgabe im Rahmen der zunehmend globalisierten Produktionsprozesse ist die Schaffung einheitlicher Vorschriften für die Prüfung, Kalibrierung und Zertifizierung von Temperatur- und Wärmemengemessgeräten und Verfahren sowie für die gegenseitige internationale Anerkennung der jeweiligen Ergebnisse mit dem Ziel der volkswirtschaftlich relevanten Weiterverbreitung der in Deutschland gültigen Regelungen und Normen. Zur Zeit gibt es eine intensive Normungstätigkeit bei Strahlungsthermometern, Thermographiegeräten, Thermoelementen, Blockkalibratoren, klinischen Fieberthermometern, Wärmemengen- und Wärmeverbrauchsmessgeräten sowie für die Wärmeleitung u. a. im Bausektor. Das Informations- und Datenbanksystems für thermische Metrologie (evitherm) wird dafür als ein wichtiges Hilfsmittel eingesetzt und weiterentwickelt.

## Themenbereich 11: Zeit und Frequenz

Bearbeitet in den Fachbereichen 4.4, 4.3 (25%)		Forschen, Entwickeln	Messen	Beraten
Personaleinsatz (Personenjahre)	2007	17,9	7,2	2,5
	2008	20,7	6,2	1,9
	2009	20,4	6,1	1,9

### Aufgaben und Ziele

Die Forschungs- und Entwicklungsaufgaben des Themenbereichs *Zeit und Frequenz* leiten sich hauptsächlich aus dem Einheiten- und Zeitgesetz (EinhZeitG) ab:

1. Darstellung der Zeiteinheit, Entwicklung der primären Zeitnormale CSF1/CSF2 zur Realisierung der SI-Sekunde mit einer relativen Unsicherheit von besser als  $10^{-15}$ .
2. Weitergabe der Zeiteinheit und der gesetzlichen Zeit über den Langwellensender DCF77, Telefonmodem sowie das Internet.
3. Internationale Satellitenzeitvergleiche mit Vergleichsgenauigkeiten von besser als  $10^{-15}$ /Tag, Mitarbeit am Aufbau des Zeitsystem des europäischen Navigationssystems Galileo.
4. Entwicklung optischer Uhren auf der Basis eines ultrakalten gespeicherten Ytterbiumions ( $^{171}\text{Yb}^+$ ), ultrakalter neutraler Strontiumatome (Sr-Gitteruhr) und auf der Basis eines optischen Kernübergangs in Thorium.
5. Entwicklung optischer Frequenzkämme und von Methoden der optischen Frequenzübertragung mittels Glasfasern.

### Gegenwärtige Situation und geplante Arbeiten

**Zu 1.** Die PTB-Zeitskala wird nach wie vor von der „klassischen“ Atomstrahluhr CS2 abgeleitet und für lange Mittelungszeiten an die Weltzeit angepasst. Die Weltzeitskalen EAL und TAI wiederum werden durch die Uhren der PTB mitbestimmt, insbesondere dadurch, dass CS1 und CS2 als einzige primäre Uhren weltweit permanent betrieben werden. Zunehmend tragen Cäsium-Fontänenuhren zur Weltzeitskala TAI bei, darunter auch die Fontänenuhr CSF1 der PTB und in 2009 erstmals CSF2 der PTB. An CSF1 wurden in den letzten Jahren grundlegende Untersuchungen zu möglichen frequenzverfälschenden Einflüssen durchgeführt und dabei neuartige physikalische Effekte entdeckt. Diese Untersuchungen mit dem Ziel einer Steigerung der Genauigkeit und Stabilität werden weitergeführt. Dabei wurde 2008 erstmals eine neuartige Mikrowellenquelle eingesetzt, die ihre Kurzzeitstabilität mittels eines Femtosekundenlaser-Frequenzkamms von einem stabilen optischen Oszillator ableitet. Die neue Cäsium-Fontänenuhr CSF2 soll 2009 vollständig evaluiert und als primäre Uhr für TAI gemeldet werden. Durch Verwendung einer Atomwolke bei geringerer Temperatur und bei geringerer Dichte als in CSF1 wird hier eine reduzierte Frequenzverschiebung durch Stöße beobachtet. Es ist geplant, die Kurzzeitstabilität dieser Uhr durch das Laden der Atome aus einem lasergekühlten Atomstrahl zu verbessern. Neben der Verbesserung der Stabilität und der Genauigkeit bleibt das Erreichen der Dauerbetriebsfestigkeit der Fontänenuhren eine wesentliche Zielsetzung. Im Ergebnis sollen die überlegenen Eigenschaften der Fontänenuhren für eine Verbesserung der Zeitskala der PTB routinemäßig genutzt werden.

**Zu 2.** Die neuen Steuereinrichtungen des Langwellensenders DCF77 werden weiter ausgebaut, so dass die Zuverlässigkeit erhöht und insbesondere die Überwachung von Braunschweig aus komplettiert wird. Die Zeitübertragung über das Internet erfordert eine laufende Modernisierung der bestehenden Server, um den stetig zunehmenden Verkehr (gegenwärtig über 2000 Abfragen pro Sekunde) bewältigen zu können.

**Zu 3.** Frequenzvergleiche über Telekommunikationssatelliten oder GPS sind zeitweise mit einer Genauigkeit von  $1 \times 10^{-15}$  bei einer Mittelungszeit von einem Tag möglich, jedoch nur während spezieller Kampagnen. Untersucht werden die Einflüsse der Betriebszustände der Einrichtungen (Zahl der Partner, verwendete Signale, Bandbreite, Leistung etc.) auf die erreichte Genauigkeit. Durch Vergleich mehrerer Verfahren, die gleichzeitig von zwei Partnern benutzt werden, sollen die Beiträge einzelner Verfahren separiert werden. Hierfür werden besonders aufwändige Verbindungen zwischen PTB und USNO sowie PTB und dem japanischen NICT betrieben. Ein neuer Schwerpunkt der Arbeit ist die Untersuchung verschiedener Auswerteverfahren für GPS-Trägerphasenmessungen

und der dafür benötigten Empfänger. Dies geschieht im Rahmen einer Zusammenarbeit mit dem Institut für Erdmessung der Leibniz-Universität Hannover.

Die PTB ist aktuell das zentrale Referenzlabor für alle internationalen Zeitvergleiche und soll mittel- und langfristig diesen Status beibehalten. Hierfür werden die existierenden Einrichtungen fortlaufend modernisiert und ergänzt. Eine automatisierte Überwachung einer Vielzahl von Funktionen und Messergebnissen erlaubt eine rasche und zuverlässige Fehlererkennung.

Bereits seit 2007 ist die PTB am Aufbau der deutschen Precise Timing Facility des Galileo-Systems beteiligt. Daneben unterstützt sie den Aufbau des Galileo Time Service Provider und strebt eine langfristige vertragliche Anerkennung als europäische Zeitreferenz für Galileo durch die Europäische Raumfahrtagentur ESA an.

**Zu 4.** Messungen der Absolutfrequenz des optischen  $^{171}\text{Yb}^+$ -Frequenznormals bei 688 THz zeigen über mehrere Jahre eine Reproduzierbarkeit auf besser als  $2 \cdot 10^{-15}$ . Der Vergleich zweier unabhängiger Normale ergab Übereinstimmung im Rahmen einer relativen Unsicherheit von  $6 \cdot 10^{-16}$ . 2008 wurde erstmals eine kontinuierliche Frequenzmessung mit CSF1 über eine Messzeit von mehreren Tagen durchgeführt. Dies erlaubt es, die statistische Unsicherheit der Frequenzmessung zu reduzieren und zeigt die Fortschritte in der Betriebszuverlässigkeit der optischen Uhr. Eine neu konstruierte Ionenfalle, verbesserte Abschirmung und Diagnose von störenden Feldern werden eine weitere Verringerung der systematischen Unsicherheit erlauben. Zur Anregung des äußerst schmalbandigen Oktupolübergangs von  $\text{Yb}^+$  bei 642 THz wurde ein frequenzstabiles Lasersystem entwickelt und erfolgreich eingesetzt. Es ist geplant, mit einem Femtosekundenlaser-Frequenzkamm das Frequenzverhältnis beider  $\text{Yb}^+$ -Frequenznormale zu messen. Dies erlaubt die Weiterentwicklung von Stabilität und Genauigkeit der Normale, Untersuchungen zur Atomstruktur von  $\text{Yb}^+$  und eine empfindliche Suche nach einer möglichen Zeitabhängigkeit der Feinstrukturkonstanten.

Die Verwendung einer großen Zahl gespeicherter ultrakalter Sr-Atome bietet gegenüber einem einzelnen Ion den Vorteil besserer Kurzzeitstabilität. Besonders aussichtsreich ist das System der Sr-Gitteruhr, bei der die Atome in einer Vielzahl von Potentialtöpfen, gebildet durch eine entsprechende optische Falle, ohne Stoßwechselwirkung gehalten werden. Die dafür erforderlichen Methoden zur Kühlung und Speicherung von Strontium-Atomen wurden entwickelt und eingesetzt. Untersucht werden sollen die erreichbaren Unsicherheit und Stabilität der optischen Frequenz mit den Isotopen  $^{88}\text{Sr}$  und  $^{87}\text{Sr}$ .

Gleichzeitig werden Laser mit der erforderlichen Kurzzeitstabilität und Linienbreiten im sub-Hertz-Bereich entwickelt. Hierzu ist es erforderlich, passive optische Resonatoren zu entwickeln, die eine geringe Empfindlichkeit gegen thermisches und seismisches Rauschen aufweisen.

Das an der PTB vorgeschlagene Konzept einer optischen Kernuhr, basierend auf dem niederenergetischen Übergang in  $^{229}\text{Th}$ , ist mittlerweile von mehreren Gruppen aufgegriffen worden. Im Frühjahr 2007 wurde eine verbesserte  $\gamma$ -spektroskopische Messung der Übergangsenergie veröffentlicht, die auf einen Übergang im Vakuumultravioletten Spektralbereich bei 7,6 eV hindeutet. Dies machte eine neue Planung für die Experimente zur Anregung des Übergangs notwendig. Es wird eine lineare Ionenfalle zur Speicherung einer großen Zahl  $\text{Th}^+$ -Ionen aufgebaut. Es soll darin Multiphotonen-Laseranregung des Kerns untersucht werden, wobei die Prozesse durch Resonanzen in der Elektronenhülle überhöht werden. Die PTB arbeitet sowohl in den internationalen Gremien als auch an den aussichtsreichsten Kandidaten für eine zukünftige Neudefinition der Zeiteinheit „Sekunde“ in führender Stellung mit.

Die Forschungsarbeiten an den optischen Uhren, basierend auf einzelnen Yb-Ionen, Sr-Atomen und dem  $^{229}\text{Th}$ -Kernübergang, werden in erheblichem Maß durch Drittmittel (Exzellenzcluster QUEST, DFG, ESA) gefördert.

**Zu 5.** Die heute verfügbaren optischen Frequenznormale sind bereits den besten Caesiumatomuhren hinsichtlich der erreichbaren Genauigkeit und Stabilität überlegen. Um das Potenzial dieser Uhren auch anderen Anwendern zur Verfügung stellen zu können, untersucht die PTB neue Verfahren zur Übertragung optischer Frequenzen über Glasfasernetze. Hierbei ist es kürzlich gelungen, ein optisches Frequenznormal am Institut für Quantenoptik in Hannover direkt über eine 73 km lange Glasfaserverbindung mit den optischen Uhren der PTB zu vergleichen. Damit konnte die Frequenz des im Mg-Frequenznormal benutzten Uhrenübergangs mit einer bisher nicht erreichten Unsicherheit bestimmt werden. Zur Untersuchung der technischen Möglichkeiten in einem europaweiten Netz wird gegenwärtig eine Teststrecke über 900 km zum Max-Planck-Institut für Quantenoptik in Garching in Betrieb genommen und hinsichtlich der erreichbaren Frequenzstabilität untersucht.

## **Themenbereich 12: Mathematik und Informationstechnik für die Metrologie**

Bearbeitet in den Fachbereichen 8.4, 8.5		Forschen, Entwickeln	Messen	Beraten
Personaleinsatz (Personenjahre)	2007	21,9	14,4	4,3
	2008	24,7	15,5	5,3
	2009	22,4	16,8	5,2

### **Aufgaben und Ziele**

Im Rahmen dieses Themenbereichs werden vorwiegend Querschnitts- und Beratungsaufgaben auf metrologisch bedeutsamen Schwerpunktgebieten der Mathematik (Datenanalyse, mathematische Modellierung, Messunsicherheit) sowie der Informationstechnik (Softwarevalidierung, Messdatensicherheit, spezielle Dienstleistungsaufgaben) auf der Grundlage eigener Forschungs- und Entwicklungsarbeiten wahrgenommen.

Das übergeordnete Ziel ist eine spezifische Unterstützung der Metrologie, die fachkundige PTB-weite Koordination dieser Aktivitäten und die Vertretung in den relevanten nationalen und internationalen Gremien.

Die spezifischen Aufgaben und Ziele der Mathematik für die Metrologie sind:

1. Numerische und analytische Modellierung physikalischer Prozesse, die von grundlegender Bedeutung für die Metrologie sind.
2. Entwicklung von Verfahren zur Datenanalyse, Signalverarbeitung und zur Bestimmung von Messunsicherheiten bei komplexen metrologischen Fragestellungen.

Die spezifischen Aufgaben und Ziele der metrologischen Informationstechnik sind:

3. Prüfung, Zulassung und Beratung im Zusammenhang mit IT-Komponenten in Messsystemen, elektronischen Wahlsystemen und Spielgeräten.
4. Entwicklung von Systemen und Verfahren zur Messdatenübertragung und -sicherheit sowie zur Softwarevalidierung in messtechnischen Systemen.

### **Gegenwärtige Situation und geplante Arbeiten**

**Zu 1.** Zentrale Aufgaben im Bereich der Mathematik für die Metrologie sind die Durchführung von Forschungsarbeiten und Drittmittelprojekten in Zusammenarbeit mit experimentell orientierten Arbeitsgruppen der PTB sowie deren Unterstützung und Beratung bei der Auswahl und Anwendung geeigneter Methoden und Werkzeuge. Insbesondere wird Expertise in den Feldern partielle Differentialgleichungen, Optimierung und inverse Methoden bereitgestellt und weiterentwickelt. Anwendungsgebiete sind insbesondere elektromagnetischer Felder, turbulente Strömungen und Verbrennungsprozesse, Transportvorgänge, Reaktions-Diffusions-Systeme sowie Biosignale und Streuprozesse. Weitere Beispiele sind im Bereich der Optik die Modellierung mikroskopischer Abbildungen sowie Nahfeldbeugung und Strahlpropagation in abbildenden Systemen. Andere Themen sind die Modellierung und Simulation für die molekulare Medizin und Zellbiologie im Zusammenhang mit Experimenten in der PTB und anderen Institutionen.

**Zu 2.** Im Mittelpunkt der Arbeit im Bereich Datenanalyse stehen Entwicklung und Anwendung von statistischen Methoden und Verfahren der Signalverarbeitung sowie virtuelle Experimente und Versuchsplanung. Anwendungsgebiete sind Aufgaben aus den Fachabteilungen der PTB (Mechanik, Elektrizität, Optik und Medizinphysik) und metrologiespezifische Anwendungen wie die Analyse von internationalen Ringvergleichen. Eine weitere Aufgabenstellung ist die Bestimmung von Messunsicherheiten für komplexe Messprozesse, wie sie z. B. für dynamische Messgrößen in der Mechanik, in der Hochfrequenztechnik, bei der Auswertung von Spektren sowie in der dimensionellen Metrologie und in der Medizinphysik auftreten.

Mathematische Modellierung und Datenanalyse sind wichtige Querschnittsaufgaben, die in vielen modernen Gebieten der Metrologie von wachsender Bedeutung sind. Simulationen und virtuelle Experimente sind wichtige Elemente bei der Entwicklung neuer Messverfahren. Komplexe Messmodelle erfordern häufig den Einsatz ausgefeilter mathematischer und statistischer Methoden wie numerische Verfahren für kontinuierliche Modelle (Differentialgleichungen), inverse Probleme und Optimierung sowie parametrische und nichtparametrische Auswerteverfahren, Filtermethoden und Signalverarbeitung. Fundamental für die Metrologie sind Verfahren zur

Bestimmung von Messunsicherheiten sowie zur Analyse von Ringvergleichen. Während die Bestimmung der Messunsicherheit für Prozesse mit einfachen Messmodellen im „Guide for the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM)“ international verbindlich geregelt ist, erfordern viele moderne Messverfahren eigenständige Forschungsarbeiten und eine stetige Weiterentwicklung von Regelungen zur Bestimmung der Messunsicherheit. Mit dieser Thematik verbunden sind interne Beratung und Weiterbildung zu neuen Verfahren zur Messunsicherheitsbestimmung, z. B. Monte-Carlo-Verfahren.

**Zu 3.** Die Situation in diesem Arbeitsgebiet ist von der anhaltenden Weiterentwicklung der Informationstechnik und der darauf sich begründenden Innovation in der Messtechnik, aber auch in Wahlsystemen und Spielgeräten gekennzeichnet. Entsprechend richten sich die geplanten Arbeiten darauf, die adäquaten technischen Anforderungen und Prüfverfahren weiter zu entwickeln, die Durchführung der Prüfungen ständig anzupassen und eine angemessene Unterstützung für die Industrie bzw. Beratung für Ministerien und Behörden zu leisten.

Eine besondere Herausforderung stellt im Zuge der immer weiter voranschreitenden IT-Integration die Zuverlässigkeit bzw. Sicherheit von (Mess-) Daten und Software dar. Das gilt in unterschiedlicher Ausprägung für die drei Arbeitsbereiche Messsysteme, Spielgeräte und elektronische Wahlsysteme. Darauf sind die informationstechnischen Querschnittsarbeitsgebiete in den Arbeitsschwerpunkten auszurichten.

**Zu 4.** Heutzutage und noch viel intensiver in Zukunft wird die Metrologie von Informationstechnologie durchsetzt und damit von ihr mehr als bisher beeinflusst sein. Zwischen Messwertdetektion und Messwertanzeige (bzw. -weiterverwendung) wirken Digitalisierung, Software, Korrekturalgorithmen, Kommunikation, Datenbanken und andere informationstechnische Prozesse, die eine Gewährleistung der Rückführung in der Messkette bzw. im (verteilten) Messsystem zu einer höchst anspruchsvollen metrologischen Aufgabe werden lässt. Besonderer Wert muss Sicherheitskonzepten beigemessen werden. Das gilt in gleichem Maße bei Spielgeräten und insbesondere bei Wahlgeräten.

Die Arbeitsgebiete sind horizontal angelegt. Sie dienen der informationstechnisch-methodischen Stützung anderer Arbeitsgebiete der PTB. Ein hoher Aufwand ist für die fachliche Absicherung der gesetzlichen Aufgaben auf den Gebieten des gesetzlichen Messwesens, der Wahlsysteme und der Spielgeräte erforderlich. Kompetente Bewertungen wären ohne einen qualifizierten fachlichen Hintergrund nicht möglich.

Neben der unterstützenden Arbeit für andere Arbeitsbereiche in der PTB und für Kunden von außerhalb erfolgt eine Zusammenarbeit mit der Industrie in Projekten. Diese Projekte sind Quellen für Erkenntnisgewinne und garantieren die direkte Verwertbarkeit der Ergebnisse.

Schwerpunkte der anwendungsorientierten Forschung und Entwicklung liegen auf den Gebieten der metrologiegerechten Softwarevalidierung und der Sicherheit von Messdaten insbesondere im Zusammenhang mit der enorm wachsenden Nutzung von Kommunikationstechniken in messtechnischen Systemen.

Es ist geplant, Forschungs- und Entwicklungsprojekte durchzuführen, in denen die Validierung und Sicherheitsfragen von Software und (Mess-) Daten so behandelt werden, wie sie sich typischerweise in der Metrologie, bei Wahlsystemen und bei Spielgeräten stellen. Einen Schwerpunkt bildet die Nutzung offener und immer vielfältigerer Kommunikationstechniken, die zu neuen Anforderungen an die Software und an die Sicherheit der (Mess-) Daten geführt hat.

## Themenbereich 13: Phys. Sicherheitstechnik, Explosionsschutz

Bearbeitet in den Fachbereichen 3.4, 3.5, 3.6, 3.7		Forschen, Entwickeln	Messen	Beraten
Personaleinsatz (Personenjahre)	2007	27,9	28,7	19,3
	2008	31,0	25,7	18,3
	2009	30,3	24,8	17,5

### Aufgaben und Ziele

Der Themenbereich 13 ist Teil des gemeinsamen BAM-PTB-Projektes „Chemisch-physikalische Sicherheitstechnik“.

Im Themenbereich *Physikalische Sicherheitstechnik und Explosionsschutz* der PTB werden folgende Aufgaben bearbeitet:

- Durchführung von Geräteprüfungen und weiterer Dienstleistungen für die Wirtschaft (Hersteller und Betreiber von Ex-Geräten und Ex-Anlagen),
- Mitwirkung in der Regelsetzung, Normung und Politikberatung als fachlich kompetenter Mittler zwischen Behörden, Aufsichtsorganen, regelsetzenden Gremien und den betroffenen Industriekreisen.
- Durchführung eigener Forschung und Entwicklung im Rahmen von Gemeinschaftsvorhaben mit Universitäten und F&E-Abteilungen von Firmen oder Firmenkonsortien (häufig KMU) zu folgenden Fragestellungen:
  - Stoffliche Eigenschaften explosionsfähiger Gemische und deren Ausbreitung
  - Aufklärung von Zündprozessen und Eigenschaften von Zündquellen und ihre Beherrschung
  - Begrenzung und Eindämmung von Explosionsauswirkungen
  - Sicherheitstechnische Gestaltung von Geräten und Anlagen

Die Ziele sind dabei:

1. Die Grundlagen für hochwertige, über die derzeitigen Normenanforderungen hinausgehende Prüf- und Zertifizierungsdienstleistungen der PTB zu schaffen.
2. An Normung und Politikberatung signifikant mitzuwirken und zur Weiterentwicklung des Standes der Technik beizutragen.
3. Durch grundlegende Forschung und Entwicklung die Innovationsfähigkeit der stark exportorientierten deutsche Industrie unter Erhaltung des Sicherheitsniveaus bei veränderten verfahrenstechnischen Prozessen zu fördern.

### Gegenwärtige Situation und geplante Arbeiten

**Zu 1.** In anspruchsvollen Fällen sind bei der Zertifizierung von Geräten weit über die Normenanforderungen hinausgehende Kenntnisse über Zündvorgänge und Zündquellen erforderlich. Hierzu gehört z. B. die Zündung explosionsfähiger Gemische an heißen Oberflächen in Abhängigkeit von der Oberflächengeometrie und der Temperaturdifferenz zum Gemisch, die gegenwärtig untersucht wird. Ein weiteres Beispiel sind hochfrequente Überspannungen oder Impulsspannungen als Sonderfall des elektrischen Funkens, die in Hochspannungsmotoren durch Teilentladungen während des Betriebes auftreten können und deren Zündprozess zu untersuchen ist.

Weiterhin können Prüfverfahren von Gerätekombinationen vereinfacht werden, wenn die Wirkungsmechanismen zur Vermeidung von Zündquellen genauer bekannt sind. Ein Beispiel hierzu sind umrichter gespeiste elektrische Motoren, bei denen der Umrichter abhängig von den Betriebszuständen unterschiedliche Erwärmungen im Motor verursacht.

**Zu 2.** Politikberatung wird durchgeführt auf EU-Ebene bei der Einführung des GHS (Globally Harmonised System of Classification and Labelling of Chemicals) sowie im Ständigen Ausschuss zur ATEX-Richtlinie 94/9/EG. Auf nationaler Ebene werden BMAS und BMWi direkt beraten. In den Beratungsbereichen Anlagen- und Gerätesicherheit ist die PTB Mitglied im Ausschuss für Betriebssicherheit (ABS) und in der Kommission für Anlagensicherheit (KAS). In Fragen des Gefahrstoffrechts und Gefahrgutrechts berät sie bei stofflichen Fragen zu brennbaren Flüssigkeiten. Daneben wird bei der Erarbeitung von Vorschriften und Normen auf internationaler Ebene (IEC) und europäischer Ebene (CEN, CENELEC) mitgewirkt.

In diesen Bereichen sollen folgende Fragestellungen im Rahmen pränormativer Forschung untersucht werden:

- Experimentell abgesicherte Festlegungen sollen zu einem europäischen harmonisierten Explosionsschutzkonzept für Gefahrgutfahrzeuge führen. Dafür werden die Bildung von explosionsfähigen Gemischen in Praxis- und Modellversuchen an Füll-, Entleer- und Flugfeldbetankungsstellen untersucht und die Anforderungen für Gefahrgutfahrzeuge in europäische Regelsetzungsgremien eingebracht.
- Zur Unterstützung der europäischen und internationalen Normungsprogramme werden die Bedingungen für die Entstehung von mechanischen Funken und heißen Oberflächen in Abhängigkeit von Werkstoffpaarung, Relativgeschwindigkeit und Kontaktkraft ermittelt sowie die Zündfähigkeit gegenüber verschiedenartigen explosionsfähigen Atmosphären untersucht.

**Zu 3.** Mittelfristig werden Forschungs- und Entwicklungsarbeiten durchgeführt, die die Basis für innovative Verfahren und Produkte (auch bei veränderten verfahrenstechnischen Bedingungen) unter Beibehaltung eines hohen Sicherheitsniveaus bilden. Dabei kommen insbesondere komplexe Modellierungs- und Simulationstechniken zur Anwendung.

- Sicherheitstechnische Kenngrößen haben eine große Bedeutung für viele industrielle Prozesse. Im Zuge der Entwicklung innovativer Produkte werden zukünftig veränderte verfahrenstechnische Prozesse (z. B. in Form der Mikroverfahrenstechnik) erforderlich, besonders bei erhöhten Drücken und Temperaturen oder für Gemische aus verschiedenen Stoffen. Der Kenngrößensatz von Stoffen und Stoffgemischen bei Normalbedingungen wird daher kontinuierlich erweitert.
- Zur Validierung der Simulation von Explosionsvorgängen mit CFD-Methoden werden in einem gemeinsamen Forschungsvorhaben mit der BAM Deflagrationen in Rohrleitungen experimentell charakterisiert und entsprechende CFD-Rechnungen durchgeführt.
- Im Rahmen der Zündschutzart „Druckfeste Kapselung“ können durch die Entwicklung einer neuen Auswertungsmethode von Messungen der laserinduzierten Fluoreszenz an NO-Radikalen (NO-LIF) in Zusammenarbeit mit der Universität Karlsruhe erstmals die Mischungsvorgänge bei einer Freistrahzündung quantitativ erfasst werden. Die so erhaltenen experimentellen Daten dienen zur Verifizierung von numerischen Berechnungen der physikalisch-chemischen Prozesse mittels statistischer Methoden.
- Die Wirkungsweise von flammensperrenden Bauelementen wie Sintermetall- oder Gitterstrukturen ist bekannt. Aktuelle Untersuchungen innovativer Materialien wie keramischer Werkstoffe sollen gezielte Entwicklungen für die Praxis ermöglichen. Zudem soll experimentell die materialtechnische Belastungsfähigkeit der Flammensperrenelemente in Abhängigkeit von z. B. Detonationsdrücken oder Verbrennungsgasen ermittelt werden. Im Rahmen eines Forschungsprojektes mit der Universität Magdeburg werden Verfahren entwickelt, die ein systematisches und methodisches Konstruieren explosionsdruckfester Gehäuse unterstützen.
- Bislang existiert keine befriedigende theoretische Beschreibung des Zusammenhanges zwischen eingetragener mechanischer Energie, Temperaturverteilung und räumlicher Ausdehnung einer heißen Oberfläche an einer mechanischen Reibstelle und deren Zündfähigkeit. Auf der Basis experimenteller Ergebnisse wird ein Modell der Energieeinkopplung und der daraus entstehenden Zündung entwickelt und mit Mitteln der numerischen Simulation verifiziert.
- Um ein detailliertes Verständnis des Zündprozesses bei unterschiedlichen elektrischen Entladungstypen (z. B. Vorentladungen in hochfrequenten Wechselfeldern, Niederspannungsfunken bei der Zündschutzart Eigensicherheit, elektrostatische Entladungen) und deren Zündwirksamkeit zu erreichen, werden sie in einem einheitlichen Modell erfasst, durch Simulationstechniken untersucht und experimentell validiert.
- Neuartige eigensichere Energieversorgungskonzepte ermöglichen es, den Anwendungsbereich der Zündschutzart „Eigensicherheit“, die insbesondere in der Mess-, Steuer- und Automatisierungstechnik angewandt wird, hinsichtlich der elektrischen Leistung um etwa eine Größenordnung zu erhöhen (z. B. von 2 W auf 20 W). Die Bestimmung und Optimierung der sicherheitstechnischen Parameter und die Ermittlung von Zündgrenzwerten ermöglichen den Entwurf eines sicherheitstechnischen Gesamtkonzeptes auch unter Einschluss von langen Anschlussleitungen.
- In Zusammenarbeit mit Industrieunternehmen und der TU Braunschweig werden übliche Brennstoffzellensysteme hinsichtlich ihrer Betriebszustände und beim Auftreten von Fehlern und Störzuständen beurteilt, um eine sicherheitstechnische Gefährdungsanalyse hinsichtlich des Auftretens explosionsfähiger Gemische sowie möglicher Zündquellen erarbeiten zu können. Darüber hinaus ist auch die Verwendung von Brennstoffzellen in explosionsgefährdeten Bereichen zu untersuchen. Neben der Bewertung der Anwendungsmöglichkeit von bereits bekannten Schutzkonzepten wird die Thematik „Gemische außerhalb der atmosphärischen Bedingungen“ ebenfalls berücksichtigt werden müssen.

## Anhang

### **A1 Mitteleinsatz für Forschung und Entwicklung**

Da eine genaue Vorhersage der Mittelverwendung und der Drittmiteleinwerbung für den Planungszeitraum nicht möglich ist, werden hier die Werte aus den letzten Jahren dokumentiert, um einen realistischen Eindruck der F&E-Situation zu vermitteln.

Alle Angaben in Mio. €:

<b>Jahr</b>	<b>2007</b>	<b>2008</b>	<b>2009</b>
<b>Stammhaushalt</b>	121,5	127,9	139,6
<b>Davon F&amp;E-Aufwendungen</b>	72,9	76,7	83,8
<b>Drittmittel</b>	7,4	8,6	(noch nicht verfügbar)
<b>Fremdvergebene F&amp;E</b>	0	0	0
<b>Personaleinsatz für F&amp;E</b>	640,4	674,4	706,1

Durch die voraussichtlich in 2010 anlaufende EU-Förderung des European Metrology Research Programme (EMRP) als eine Artikel-169-Maßnahme sind in den kommenden sieben Jahren Mittelzuwächse für F&E zu erwarten. Im Rahmen dieses Programmes besteht für die PTB die Möglichkeit und das Ziel, im Planungszeitraum jährlich zusätzliche Fördermittel im hohen einstelligen Millionenbereich einzuwerben.

## **A2 Satzung der PTB**

**Satzung  
der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt  
(PTB)  
vom 12. März 1996**

- § 1 [Name, Rechtsnatur](#)
- § 2 [Tätigkeitsbereich](#)
- § 3 [Aufgaben](#)
- § 4 [Berichterstattung, Arbeitsprogramm](#)
- § 5 [Leitung und Vertretung](#)
- § 6 [Innere Organisation](#)
- § 7 [Kuratorium](#)
- § 8 [Vollversammlung für das Eichwesen](#)
- § 9 [Inkrafttreten](#)

### § 1

#### Name, Rechtsnatur

(1) Die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (Bundesanstalt) ist nach § 12 des Gesetzes über das Meß- und Eichwesen (Eichgesetz) vom 11. Juli 1969 in der Fassung der Bekanntmachung vom 23. März 1992 (BGBl. I S. 711), zuletzt geändert am 21. Dezember 1992, eine bundesunmittelbare, nicht-rechtsfähige Anstalt des öffentlichen Rechts im Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Wirtschaft. Sie ist eine Bundesoberbehörde mit Sitz in Braunschweig und Berlin.

(2) Die Bundesanstalt ist nach Maßgabe des § 1 des Abkommens über die Übernahme der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt, Berlin-Charlottenburg, auf die Bundesrepublik Deutschland und ihre Vereinigung mit der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt in Braunschweig vom 21. September 1953 (BANz. Nr. 188 vom 30. September 1953) Nachfolgerin der im Jahre 1887 gegründeten Physikalisch-Technischen Reichsanstalt.

### § 2

#### Tätigkeitsbereich

Die Tätigkeit der Bundesanstalt erstreckt sich auf

- (1) die Darstellung, Bewahrung und Weitergabe der physikalischen Einheiten (Einheiten im Meßwesen) zur Sicherung der nationalen und internationalen Einheitlichkeiten der Maße sowie die Bestimmung von Fundamentalkonstanten;
- (2) die wissenschaftliche Bearbeitung des physikalisch-technischen Meßwesens, insbesondere der Präzisionsmeßtechnik;
- (3) die Untersuchung von Stoffen auf ihre Struktur und ihre physikalischen Eigenschaften;
- (4) die Förderung von Wissenschaft und Wirtschaft durch Forschung und Entwicklung, Kalibrierung, Prüfung und Zulassung, Beratung und Information im Rahmen ihrer wissenschaftlich-technischen Kapazität.

### **§ 3**

#### **Aufgaben**

- (1) Die Bundesanstalt führt die ihr durch Gesetz oder Verordnung übertragenen Aufgaben auf den Gebieten der Einheiten, des Eichwesens, der Sicherheitstechnik, der Heilkunde, des Strahlenschutzes und der nuklearen Sicherheit sowie weitere Aufgaben aus, die ihr durch Rechtsvorschriften oder besonderen Auftrag überwiesen werden.
- (2) Die Bundesanstalt vertritt die Bundesrepublik Deutschland auf den ihr durch Gesetz übertragenen Aufgabengebieten gegenüber Einrichtungen des Auslands und internationalen Organisationen in fachlichen Fragen.
- (3) Die Bundesanstalt berät und unterstützt die Bundesregierung bei der Vorbereitung und Durchführung wirtschaftspolitischer und anderer Entscheidungen, die mit wissenschaftlich-technischen Fragen ihrer Aufgabengebiete zusammenhängen.
- (4) Die Bundesanstalt führt auf ihren Arbeitsgebieten Aufträge Dritter, insbesondere der Wirtschaft, durch.

### **§ 4**

#### **Berichterstattung, Arbeitsprogramm**

- (1) Die Bundesanstalt legt dem Bundesministerium für Wirtschaft und der Öffentlichkeit Jahresberichte über die geleistete Arbeit und die erzielten Ergebnisse vor.
- (2) Zur Erfüllung ihrer Aufgaben stellt sie ein jährlich fortzuschreibendes Arbeitsprogramm auf.
- (3) Die Bundesanstalt berichtet dem BMWi und dem Kuratorium über ihre strategischen Ziele.

### **§ 5**

#### **Leitung und Vertretung**

- (1) Die Bundesanstalt wird von dem Präsidenten geleitet; sein ständiger Vertreter ist der Vizepräsident und im Verhinderungsfall der in der Geschäftsordnung bestimmte weitere Vertreter.
- (2) Der Präsident - und im Falle seiner Verhinderung einer seiner ständigen Vertreter - vertritt die Bundesrepublik Deutschland gerichtlich und außergerichtlich in allen Angelegenheiten, welche die Bundesanstalt betreffen.
- (3) Der Präsident wird auf Vorschlag des Bundesministeriums für Wirtschaft durch den Bundespräsidenten ernannt. Das Kuratorium der Bundesanstalt benennt dem Bundesministerium für Wirtschaft geeignete Kandidaten.

### **§ 6**

#### **Innere Organisation**

Die innere Organisation der Bundesanstalt sowie der Geschäftsablauf werden in ihrer Geschäftsordnung geregelt. Die Geschäftsordnung wird vom Präsidenten erlassen; sie bedarf der Zustimmung des Bundesministeriums für Wirtschaft. Zur Steigerung der Effizienz der Aufgabenerledigung dient eine Kosten- und Leistungsrechnung.

## **§ 7**

### **Kuratorium**

- (1) Bei der Bundesanstalt besteht ein Kuratorium. Es berät die Bundesanstalt und das Bundesministerium für Wirtschaft in wichtigen Fragen, welche die Bundesanstalt betreffen.
- (2) Präsident des Kuratoriums ist der für die Bundesanstalt fachlich zuständige Abteilungsleiter des Bundesministeriums für Wirtschaft.
- (3) Das Kuratorium besteht aus nicht mehr als 30 ehrenamtlichen Mitgliedern aus Kreisen der Wissenschaft und Wirtschaft. Das Kuratorium schlägt dem Bundesministerium für Wirtschaft Mitglieder zur Berufung oder Abberufung vor. Die Berufung erfolgt für fünf Jahre, eine Wiederberufung ist zulässig.
- (4) An den Sitzungen des Kuratoriums nehmen außerdem teil:
  - der Präsident,
  - seine ständigen Vertreter,
  - die Abteilungsleiter der Bundesanstalt,
  - Beauftragte des Bundesministeriums für Wirtschaft.
- (5) Das Kuratorium gibt sich eine Geschäftsordnung, die der Zustimmung des Bundesministeriums für Wirtschaft bedarf.

## **§ 8**

### **Vollversammlung für das Eichwesen**

- (1) Bei der Bundesanstalt besteht eine „Vollversammlung für das Eichwesen“. Sie berät und beschließt über technische Angelegenheiten des Eichwesens, die für die Anwendung und Fortentwicklung des Eichrechts von Bedeutung sind.
- (2) Beschlüsse der Vollversammlung sind Empfehlungen für die Arbeit der Bundesanstalt und der Eichaufsichtsbehörden bei der Durchführung des Eichgesetzes.
- (3) Die Mitglieder der Vollversammlung sind der Präsident der Bundesanstalt und die von ihm berufenen Mitarbeiter sowie die Leiter der Eichaufsichtsbehörden als Vertreter der Länder.
- (4) Die Vollversammlung wird vom Präsidenten der Bundesanstalt geleitet.
- (5) Das Bundesministerium für Wirtschaft ist in der Vollversammlung ständig vertreten.
- (6) Die Geschäftsordnung der Vollversammlung wird vom Präsidenten der Bundesanstalt erlassen; sie bedarf der Zustimmung des Bundesministeriums für Wirtschaft.

## **§ 9**

### **Inkrafttreten**

Diese Satzung tritt am Tage ihrer Veröffentlichung im Bundesanzeiger in Kraft.

Gleichzeitig tritt die Satzung der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) in Braunschweig und Berlin vom 01. August 1977 (Bundesanzeiger Nr. 151 vom 16. August 1977) außer Kraft.

Bonn, den 12. März 1996

Der Bundesminister für Wirtschaft

Dr. Günter Rexrodt

**A3 Liste der gesetzlichen Aufgaben**

Gesetz, VO, Richtlinie, Abkommen	BGBl. Teil Seite	Zuletzt geändert Datum, BGBl. Teil Seite	Aufgabe	§§	Fachl. zuständ. Ressort	Zielsetzung für die PTB
<p>Gesetz über die Einheiten im Messwesen und die Zeitbestimmung - Einheiten- und Zeitgesetz (Einh-ZeitG)</p> <p>Bek. vom 22. Februar 1985</p>	I, 408	03.07.2008, I, 1185	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Darstellung der gesetzlichen Einheiten</li> <li>2. Darstellung der Temperaturskala</li> <li>3. Darstellung und Verbreitung der gesetzlichen Zeit</li> </ol>	§ 6	BMW	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aufbau eines geschlossenen international geltenden metrischen Einheitensystems</li> <li>• Schaffung einer bundeseinheitlichen Zeit</li> <li>• Festlegung der öffentlichen mitteleuropäischen Uhrzeit auf der Basis der koordinierten Weltzeit UTC</li> <li>• Darstellung und Verbreitung der Basiseinheit „Sekunde“</li> <li>• Darstellung der Zeitskala nach der Int. Atomzeitskala der Int. Meterkonvention</li> <li>• Bekanntmachung der Verfahren, nach denen Zeiteinheiten und Zeitskalen dargestellt werden</li> </ul>
<p>Ausführungsverordnung zum Gesetz über Einheiten im Messwesen (Einheitenverordnung - EinV)</p> <p>Bek. vom 13.12.1985</p>	I, 2272	03.07.2008, I, 1185	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Anschluss der nationalen Prototype an die internationalen Prototype</li> <li>2. Aufbewahrung der nationalen Prototype, Einheitenverkörperungen und Normale</li> <li>3. Bekanntmachung der Verfahren, nach denen nicht verkörperte Einheiten dargestellt werden</li> </ol>			<ul style="list-style-type: none"> <li>• Anpassung an die technische Entwicklung</li> <li>• Bundeseinheitliche Koordination von Einheiten- und Eichwesen</li> </ul>

Gesetz, VO, Richtlinie, Abkommen	BGBl. Teil Seite	Zuletzt geändert Datum, BGBl. Teil Seite	Aufgabe	§§	Fachl. zuständ. Ressort	Zielsetzung für die PTB
Gesetz über das Mess- und Eichwesen (Eichgesetz - EichG)  Bek. vom 23.03.1992	I, 711	03.07.2008, I, 1185	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Entwicklung u. Darstellung der phys.-techn. Einheiten</li> <li>2. Zulassung der Bauart von Messgeräten</li> <li>3. Beratung sowie Prüfungen von Normalgeräten u. Prüfungshilfsmitteln der zuständigen Behörden und staatlich anerkannten Prüfstellen</li> <li>4. Forschung auf dem Gebiet des physikalisch-technischen Messwesens</li> <li>4. Prüfungen und Untersuchungen auf diesem Gebiet</li> <li>5. Abstimmung der Zusammenarbeit der zur Durchführung des Gesetzes anerkannten Stellen</li> </ol>	§ 13	BMW	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Schutz des Verbrauchers als Konsument und Bezieher messbarer und gemessener Leistungen</li> <li>• Förderung der Lauterkeit des Wettbewerbs</li> <li>• Rationalisierung in Industrie und Handel durch Beschränkung auf gesetzlich festgelegte Typen</li> <li>• Förderung des Leistungswettbewerbs durch Mindestanforderungen an Messgeräte (Bauartanforderungen)</li> <li>• Sicherung der Qualität der Messgeräte auch im internationalen Vergleich</li> <li>• Bundeseinheitlicher Vollzug zur Behandlung von Mess- und Normalgeräten</li> </ul>

Gesetz, VO, Richtlinie, Abkommen	BGBl. Teil Seite	Zuletzt geändert Datum, BGBl. Teil Seite	Aufgabe	§§	Fachl. zuständ. Ressort	Zielsetzung für die PTB
Eichordnung (EO)  Bek. vom 12.08.1988	I, 1657	13.12.2007 I, 2930	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Erteilung von Bauartzulassungen für Messgeräte</li> <li>2. Vergleichsmessungen an Dosimetersonden</li> <li>3. Benannte Stelle für Messgeräte nach Richtlinie 2004/22/EG und 90/384/EWG</li> <li>4. Beratung und Unterstützung der zuständigen Behörden bei der Marktaufsicht</li> <li>5. Anerkennung der Prüfeinrichtungen der staatlich anerkannten Prüfstellen</li> <li>6. Anerkennung der Gleichwertigkeit national geregelter Messgeräte im EWR</li> </ol>	<p>§ 13 EichG i.V.m. EO</p> <p>§ 2 (3)</p> <p>§ 7 f, 7k, 7l, 7n</p> <p>§ 7p</p> <p>§ 47</p> <p>§ 80</p>	BMW	siehe EichG
Fertigpackungsverordnung (FPV)  Bek. vom 08.03.1994	I, 451	11.06.2008 I, 1079	Anerkennung von Herstellerzeichen für Maßbehälter	§ 4	BMW	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Schutz des Verbrauchers als Konsument messbarer Leistungen</li> </ul>

Gesetz, VO, Richtlinie, Abkommen	BGBl. Teil Seite	Zuletzt geändert Datum, BGBl. Teil Seite	Aufgabe	§§	Fachl. zuständ. Ressort	Zielsetzung für die PTB
Gesetz über die Prüfung und Zulassung von Feuerwaffen, Böllern, Geräten, bei denen zum Antrieb Munition verwendet wird, sowie von Munition und sonstigen Waffen (Beschussgesetz - BeschG) Bek. vom 11.10.2002	I, 3970 und 4003	26.03.2008, I, 426	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Zulassung der Bauart von Schussapparaten, Einsteckläufen und nicht der Beschusspflicht unterliegenden Feuerwaffen, Systemprüfungen von Schussapparaten und der in ihnen zu verwendenden Kartuschenmunition</li> <li>2. Zulassung von Schreckschuss-, Reizstoff- und Signalwaffen</li> <li>3. Entgegennahme von Anzeigen gemäß § 9 Abs. 2</li> <li>4. Bauartzulassungen nach § 9 Abs. 4</li> <li>5. Prüfung von Elektroimpulsgeräten, Reizstoffsprühgeräten und Springmessern</li> <li>6. Führen und Auslegen einer Liste der Prüfungen und Zulassungen</li> </ol>	<p>§ 20 i.V.m. § 7</p> <p>§ 8</p> <p>§ 9 (2)</p> <p>§ 9 (4)</p> <p>§ 9 (4)</p> <p>§ 20 (4)</p>	BMI	Prüfung von Feuerwaffen und Schussapparaten im Interesse der Sicherheit für die Verwender und für Dritte
Allgemeine Beschussgesetz-Verordnung (BeschussV) Bek. vom 13.07.2006	I, 1471	30.10.2008, I, 2130	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Prüfung der technischen Anforderungen von Gasböllern</li> <li>2. Bauartzulassung für besondere Schusswaffen, pyrotechnische Munition und Schussapparate, insbesondere Erstellung von Prüfregeln, Systemprüfung für Waffen nach § 7 BeschussG, Zulassung von Ausnahmen</li> <li>3. Prüfung von Betriebsanleitungen</li> </ol>	<p>§ 8</p> <p>§ 11</p> <p>§ 13</p>	BMI	s. BeschussG

Gesetz, VO, Richtlinie, Abkommen	BGBl. Teil Seite	Zuletzt geändert Datum, BGBl. Teil Seite	Aufgabe	§§	Fachl. zuständ. Ressort	Zielsetzung für die PTB
			4. Prüfung von Anforderungen 5. Prüfung von nicht tragbaren Geräten 6. Mitteilungen an die Ständige Internationale Kommission 7. Periodische Bauartkontrollen 8. Überprüfungen im Einzelfall 9. Veröffentlichung von Abweichungen von den Maßstafeln 10. Erstellung und Aktualisierung von Prüfrichtlinien 11. Mitgliedschaft im Beschussrat	§ 15 § 18 §§ 21, 36 § 22 § 23 § 27 § 31 § 41		
Waffengesetz (WaffG) Bek. vom 11.10.2002	I, 3970	26.3.2008, I, 426	1. Zulassung von Blockiersystemen für Erbwaffen 2. Entgegennahme von Anzeigen	§ 24 (5)	BMI	s. BeschussG
Internationales Abkommen über die gegenseitige Anerkennung der Prüfzeichen auf Handfeuerwaffen			Angleichung und Verbesserung der Prüfbedingungen. In diesem Rahmen Vergleichsmessungen		BMI	s. BeschussG

Gesetz, VO, Richtlinie, Abkommen	BGBl. Teil Seite	Zuletzt geändert Datum, BGBl. Teil Seite	Aufgabe	§§	Fachl. zuständ. Ressort	Zielsetzung für die PTB
Gesetz über Medizinprodukte (Medizinproduktegesetz - MPG)  Bek. vom 07.08.2002	I, 3146	14.06.2007, I, 1066	Sicherung der Einheitlichkeit des Messwesens in der Heilkunde  und  1. Gutachtliche Bewertung von Medizinprodukten mit Messfunktion  2. Baumusterprüfungen	§ 32 (3) i.V.m. § 15	BMG	Zentrale Erfassung und Bewertung von Risiken durch Medizinprodukte  Schutz von Patienten, Anwendern und Dritten bei dem Umgang, dem Betreiben und der Anwendung von Medizinprodukten
Verordnung über das Errichten, Betreiben und Anwenden von Medizinprodukten (Medizinprodukte-Betreiberverordnung – MPBetreibV)  Bek. vom 21.08.2002	I, 3396	31.10.2006, I, 2407	1. Mitgliedschaft im wissenschaftlichen Beirat der Bundesärztekammer (BÄK)  2. Einvernehmliche Ausführung der Aufgaben nach der RiLiBÄK mit der BÄK	§ 4 a		s. o.
Gesetz zum vorsorgenden Schutz der Bevölkerung gegen Strahlenbelastung (Strahlenschutzvorsorgegesetz - StrVG)  Bek. vom 19.12.1986	I, 2610	08.04.2008, I 1793	Bereitstellung von Radioaktivitätsstandards (Vergleichsmessungen und -analysen)	§ 11 (5)	BMU	Schutz der Bevölkerung durch Überwachung der Radioaktivität in der Umwelt

Gesetz, VO, Richtlinie, Abkommen	BGBl. Teil Seite	Zuletzt geändert Datum, BGBl. Teil Seite	Aufgabe	§§	Fachl. zuständ. Ressort	Zielsetzung für die PTB
Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen (Strahlenschutzverordnung - StrlSchV)  Bek. vom 20.07.2001	I, 1714, 2002 I 1459	29.08.2008, I 1793	1. Bauartprüfung von Anlagen, Geräten oder sonstigen Vorrichtungen, die radioaktive Stoffe enthalten oder ionisierende Strahlen erzeugen  2. Gutachten zur Dichtheit umschlossener radioaktiver Stoffe	§ 25 (2)  § 66	BMU	Schutz von Leben, Gesundheit und Sachgütern vor den Gefahren der Kernenergie und der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlen
Verordnung über den Schutz vor Schäden durch Röntgenstrahlen (Röntgenverordnung - RöV)  Bek. vom 30.04.2003	I, 604		1. Bauartprüfung von Röntgenstrahlern, Schulröntgeneinrichtungen, Hoch- und Vollschutzgeräten, Störstrahlern  2. Durchführung von Maßnahmen zur Qualitätssicherung für Messstellen	§ 8  § 35	BMU	s. StrlSchV  Qualitätssicherung
Gefahrgutbeförderungsgesetz (GGBefG)  Bek. vom 29.09.1998	I, 3114	31.10.2006 I, 2407	Anhörung vor Erlass von Rechtsvorschriften	§ 7 a	BMVBS	Schutz der Bevölkerung vor Gefahren und Belästigungen durch die Beförderung gefährlicher Güter
Verordnung über die Beförderung gefährlicher Güter mit Seeschiffen (Gefahrgutverordnung See – GGVSee)  Bek. vom 03.12.2007	I, 2815		Zuständige Behörde für gefährliche Güter der Klasse 3 im IMDG-Code	§ 6 (6)	BMVBS	Schutz der Bevölkerung vor Gefahren und Belästigungen durch die Beförderung gefährlicher Güter

Gesetz, VO, Richtlinie, Abkommen	BGBl. Teil Seite	Zuletzt geändert Datum, BGBl. Teil Seite	Aufgabe	§§	Fachl. zuständ. Ressort	Zielsetzung für die PTB
Verordnung über die innerstaatliche und grenzüberschreitende Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße und mit Eisenbahnen (Gefahrgutverordnung Straße und Eisenbahn - GGVSE)  Bek. vom 24.11.2006	I, 2683		<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Einvernehmliche Prüfung, Erteilung der Kennzeichnung und Baumusterzulassung von ortsbeweglichen Tanks, Tankcontainern und Gascontainern mit der BAM</li> <li>2. Einvernehmliche Prüfung von Anlagen mit der BAM</li> <li>3. Einvernehmliche Prüfung von Tanks, Tankcontainern, Tankwechselaufbauten und Gascontainern mit der BAM</li> </ol>	<p>§ 6 (2) Nr. 12</p> <p>§ 6 (5) Nr. 4</p> <p>§ 6 (7) Nr. 3</p>	BMVBS	Schutz der Bevölkerung vor Gefahren und Belästigungen durch die Beförderung gefährlicher Güter
Verordnung über die Beförderung gefährlicher Güter auf Binnengewässern (Gefahrgutverordnung Binnenschifffahrt – GGVBinSch)  Bek. vom 31.1.2004	I, 136	26.06.2007,  I, 1222	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Zulassung von Flammendurchschlagssicherungen</li> <li>2. Zulassung von Probeentnahmeeinrichtungen</li> </ol>	<p>§ 6 (10) Nr. 1</p> <p>§ 6 (10) Nr. 2</p>	BMVBS	s. GGVSE
Gewerbeordnung (GewO)  Bek. vom 22.02.1999	I, 202	28.03.2009, I, 634	Bauartzulassungen von Spielgeräten mit Gewinnmöglichkeit	§ 33 c GewO i.V.m. §§ 11 ff. SpielV	BMW i	Schutz der Bevölkerung vor übermäßiger gewerbsmäßiger Ausnutzung des menschlichen Spieltriebs durch unangemessen hohe Verluste in kurzer Zeit (§ 33 e GewO)

Gesetz, VO, Richtlinie, Abkommen	BGBl. Teil Seite	Zuletzt geändert Datum, BGBl. Teil Seite	Aufgabe	§§	Fachl. zuständ. Ressort	Zielsetzung für die PTB
Verordnung über Spielgeräte und andere Spiele mit Gewinnmöglichkeit (Spielverordnung - SpielV)  Bek. vom 27.01.2006	I, 280		Ausgabe von Zulassungsbelegen und Zulassungszeichen für jedes Nachbaugerät im stehenden Gewerbe	§ 15	BMW i	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Schutz der Allgemeinheit, der Gäste oder der Bewohner des jeweiligen Betriebsgrundstückes eines Geldspielgerätes oder der Nachbargrundstücke vor Einwirkungen durch Geldspielgeräte (§ 33 c GewO)</li> <li>• Jugendschutz</li> </ul>
Verordnung über das Verfahren bei der Erteilung von Unbedenklichkeitsbescheinigungen für andere Spiele i.S.d. § 33 d Abs. 1 Gewerbeordnung (Verordnung über die Erteilung von Unbedenklichkeitsbescheinigungen - UnbBeschErtV)  Bek. vom 10.04.1995	I, 510	10.11.2001, I, 2992	Mitwirkung bei der Erteilung von Unbedenklichkeitsbescheinigungen durch das BKA	§ 1	BMW i	
Verordnung über den Einsatz von Wahlgeräten bei Wahlen zum Deutschen Bundestag und der Abgeordneten des Europäischen Parlamentes (Bundeswahlgeräteverordnung - BWahlGV)  Bek. vom 03.09.1975	I, 2459	20.04.1999, I, 749	Prüfung der Bauart von Wahlgeräten	§ 2	BMI	Schutz des Grundsatzes der freien und gleichen Wahl zum Bundestag nach Art. 38 GG durch Berücksichtigung aller Stimmen in gleichem Umfang nach Zählung durch technisch einwandfreie Geräte

Gesetz, VO, Richtlinie, Abkommen	BGBl. Teil Seite	Zuletzt geändert Datum, BGBl. Teil Seite	Aufgabe	§§	Fachl. zuständ. Ressort	Zielsetzung für die PTB
Verordnung über Gashochdruckleitungen  Bek. vom 17.12.1974	I, 3591	06.01.2004, I, 19	Mitgliedschaft im Ausschuss für Gashochdruckleitungen	§ 14	BMW i	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Abwendung von Gefahren für Beschäftigte an Gashochdruckleitungen und Dritte</li> <li>• Verbraucher – und Arbeitsschutz durch bundeseinheitliche Normungs- und Sachverständigentätigkeit</li> </ul>
Gesetz über technische Arbeitsmittel und Verbraucherprodukte (Geräte- und Produktsicherheitsgesetz-GPSG)  Bek. vom 06.01.2004 in Verbindung mit  11. Verordnung zum Geräte- und Produktsicherheitsgesetz (Explosionsschutzverordnung – 11. GPSVG)  Bek. vom 12.12.1996	I, 2          I, 1914	          06.01.2004, I, 2	Zertifizierungsstelle für Explosionsschutz gemäß EG-Richtlinie 94/9/EG          Zertifizierungsstelle für Explosionsschutz gemäß EG-Richtlinie 94/9/EG	§ 3          § 4	BMW i	Verbraucher – und Arbeitsschutz
Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung (StVZO)  Bek. vom 28.09.1988	I, 1793	21.04.2009, I, 872	Bauartprüfung für Prüfgeräte nach § 57 a StVZO	§§ 57 b	BMVBS	Sicherung der Qualität von Messgeräten durch Mindestanforderungen

<b>Gesetz, VO, Richtlinie, Abkommen</b>	<b>BGBI. Teil Seite</b>	<b>Zuletzt geändert Datum, BGBI. Teil Seite</b>	<b>Aufgabe</b>	<b>§§</b>	<b>Fachl. zuständ. Ressort</b>	<b>Zielsetzung für die PTB</b>
Verordnung über die verbrauchsabhängige Abrechnung der Heiz- und Warmwasserkosten (HeizkostenV)  Bek. vom 20.01.1989	I, 115		Mitwirkung bei der Bestätigung sachverständiger Stellen zur Begutachtung von Einrichtungen zur Erfassung des Wärmeverbrauches	§ 5 (1)	BMWi und BMVBS	Verbraucherschutz auf dem Gebiet der Abrechnung von Heizkosten und Warmwasserkosten
Gesetz über den Verkehr mit Arzneimitteln (Arzneimittelgesetz)  Bek. vom 12.12.2005 in Verbindung mit Arzneibuchverordnung	I, 3394	23.11.2007, I, 2631	Bereitstellung von Aktivitätsnormalen für den Bereich Nuklearmedizin	§ 55 (2)	BMG	Sicherung der Einheitlichkeit des Messwesens in der Heilkunde
Internationale Meterkonvention vom 20.05.1875	RGBI. 1876, 191	25.05.1927, RGBI. II 409	Internationale Zusammenarbeit zur Festlegung der physikalisch-technischen Einheiten		BMWi	Vertretung der Bundesrepublik Deutschland
Übereinkommen zur Errichtung einer Internationalen Organisation für das gesetzliche Meßwesen (OIML) vom 12.10.1955	II, 1959 673		Internationale Zusammenarbeit auf dem Gebiet des gesetzlichen Messwesens		BMWi	Vertretung der Bundesrepublik Deutschland

## ***A4 Organigramm der PTB***

<b>Präsident</b> Prof. Dr. E. O. Göbel Tel.: 1000	<b>Vizepräsident</b> Prof. Dr. M. Peters Tel.: 2000	<b>Mitglied des Präsidiums</b> Dr. J. Stenger Tel.: 3000
---	---	--

Fachbereich PS  
Präsidentaler Stab  
Dr. R. Wynands  
Tel.: 1009

Presse- und  
Öffentlichkeitsarbeit  
Dr. Dr. J. Simon  
Tel.: 3005

Vertreter d.Präsidenten  
in Berlin  
Dr. W. Buck  
Tel.: (Ch) 7454

Qualitätsmanager  
Dr. A. Odin  
Tel.: 8330

Abteilung 1  
Mechanik und Akustik  
Dr. R. Schwartz  
Tel.: 1010

Abteilung 2  
Elektrizität  
Dr. U. Siegner  
Tel.: 2010

Abteilung 3  
Chemische Physik u.  
Explosionsschutz  
Prof. Dr. K.-D. Sommer  
Tel. 3010

Abteilung 4  
Optik  
Dr. F. Riehle  
Tel.: 4010

Abteilung 5  
Fertigungsmesstechnik  
Dr. H. Bosse  
Tel.: 5010

Abteilung 6  
Ionisierende Strahlung  
Dr. H. Janßen  
Tel.: 6010

Abteilung 7  
Temperatur und  
Synchrotronstrahlung  
Dr. W. Buck  
Tel.: (Ch) 7454

Abteilung 8  
Medizinphysik und  
metrologische  
Informationstechnik  
Prof. Dr. H. Koch  
Tel.: (Ch) 7343

Abteilung Q  
Wissenschaftlich-  
technische  
Querschnittsaufgaben  
Dr. R. Weiß  
Tel.: 8010

Abteilung Z  
Verwaltungsdienste  
C. Tampier  
Tel.: 9010

Fachbereich 1.1  
Masse  
Dr. P. Zervos  
Tel.: 1100

Fachbereich 2.1  
Gleichstrom und  
Niederfrequenz  
Dr. J. Melcher  
Tel.: 2100

Fachbereich 3.1  
Metrologie in der  
Chemie  
Dr. B. Güttler  
Tel.: 3100

Fachbereich 4.1  
Photometrie und an-  
gewandte Radiometrie  
Dr. K. Stock  
Tel.: 4100

Fachbereich 5.1  
Oberflächenmess-  
technik  
Dr. L. Koenders  
Tel.: 5100

Fachbereich 6.1  
Radioaktivität  
Dr. D. Arnold  
Tel.: 6100

Fachbereich 7.1  
Röntgenmesstechnik  
mit Synchrotron-  
strahlung  
Prof. Dr. M. Richter  
Tel.: (Ad) 5084

Fachbereich 8.1  
Medizinische  
Messtechnik  
Dr. B. Ittermann  
Tel.: (Ch) 7318

Referat Q.11  
Wissenschaftliche  
Bibliotheken  
Dr. J. Meier  
Tel.: 8131

Referat Z.11  
Haushalt und  
Beschaffung  
M. Wasnuß  
Tel.: 9110

Fachbereich 1.2  
Festkörpermechanik  
Dr. R. Kümme  
Tel.: 1200

Fachbereich 2.2  
Hochfrequenz und  
Felder  
Dr. T. Schrader  
Tel.: 2200

Fachbereich 3.2  
Gasanalytik und  
Zustandsverhalten  
\*Prof. Dr. K.-D. Sommer  
Tel.: 3010

Fachbereich 4.2  
Bild- und Wellenoptik  
Dr. E. Buhr  
Tel.: 4200

Fachbereich 5.2  
Dimensionelle  
Nanometrologie  
\*Dr. H. Bosse  
Tel.: 5010

Fachbereich 6.2  
Dosimetrie für  
Strahlentherapie und  
Röntgendiagnostik  
Dr. H.-M. Kramer  
Tel.: 6200

Fachbereich 7.2  
Radiometrie mit  
Synchrotronstrahlung  
Dr. G. Ulm  
Tel.: (Ch) 7312

Fachbereich 8.2  
Biosignale  
Dr. L. Trahms  
Tel.: (Ch) 7213

Fachbereich Q.2  
Theoretische  
Grundlagen  
\*Dr. R. Weiß  
Tel.: 8010

Referat Z.12  
Personal  
S. Wiemann  
Tel.: 9120

Fachbereich 1.3  
Kinematik  
Dr. F. M. Jäger  
Tel.: 1300

Fachbereich 2.3  
Elektrische  
Energiesmesstechnik  
Dr. M. Kahmann  
Tel.: 2300

Fachbereich 3.3  
Stoffeigenschaften  
und Druck  
Dr. H. Bauer  
Tel.: 3300

Fachbereich 4.3  
Quantenoptik und  
Längeneinheit  
Dr. P. Becker  
Tel.: 4300

Fachbereich 5.3  
Koordinatenmess-  
technik  
Dr. F. Härtig  
Tel.: 5300

Fachbereich 6.3  
Strahlenschutz-  
dosimetrie  
Dr. P. Ambrosi  
Tel.: 6300

Fachbereich 7.3  
Detektorradiometrie  
und Strahlungs-  
thermometrie  
Dr. J. Hollandt  
Tel.: (Ch) 7369

Fachbereich 8.3  
Biomedizinische Optik  
Prof. Dr. R. Macdonald  
Tel.: (Ch) 7542

Fachbereich Q.3  
Gesetzl. Messwesen  
u. Technologietransfer  
Dr. P. Ulbig  
Tel.: 8300

Referat Z.13  
Justizariat  
M. Gahrens  
Tel.: 9130

Fachbereich 1.4  
Gase  
Dr. H. Többen  
Tel.: 1400

Fachbereich 2.4  
Quantenelektronik  
Dr. A. Zorin  
Tel.: 2400

Fachbereich 3.4  
Grundlagen des  
Explosionsschutzes  
Dr. H. Bothe  
Tel.: 3400

Fachbereich 4.4  
Zeit und Frequenz  
Dr. E. Peik  
Tel.: 4400

Fachbereich 5.4  
Interferometrie an  
Maßverkörperungen  
Dr. A. Abou-Zeid  
Tel.: 5400

Fachbereich 6.4  
Ionenbeschl.u.Refe-  
renzstrahlungsfelder  
Dr. F. Wissmann  
Tel.: 6400

Fachbereich 7.4  
Temperatur  
Dr. J. Fischer  
Tel.: (Ch) 7473

Fachbereich 8.4  
Mathematische  
Modellierung und  
Datenanalyse  
Dr. M. Bär  
Tel.: (Ch) 7687

Fachbereich Q.4  
Informations-  
technologie  
Dr. S. Hackel  
Tel.: 8400

Referat Z.14  
Organisation und  
Controlling  
Dr. J. Jaspers  
Tel.: 9140

Fachbereich 1.5  
Flüssigkeiten  
Dr. G. Wendt  
Tel.: 1500

Fachbereich 2.5  
Halbleiterphysik und  
Magnetismus  
\*Dr. U. Siegner  
Tel.: 2500

Fachbereich 3.5  
Zünddurchschlags-  
prozesse  
Dr. U. Klausmeyer  
Tel.: 3500

Fachbereich 4.5  
Optische Technologien  
Dr. S. Kück  
Tel.: 4500

Fachbereich 5.5  
Wissenschaftlicher  
Gerätebau  
Prof. Dr. F. Löffler  
Tel.: 5500

Fachbereich 6.5  
Neutronenstrahlung  
Dr. H. Schuhmacher  
Tel.: 6500

Fachbereich 7.5  
Kryo- und  
Vakuumpophysik  
Dr. T. Schurig  
Tel.: (Ch) 7290

Fachbereich 8.5  
Metrologische  
Informationstechnik  
Prof. Dr. D. Richter  
Tel.: (Ch) 7479

Fachbereich Q.5  
Technische  
Zusammenarbeit  
D. Schwohnke  
Tel.: 8200

Referat Z.15  
Verwaltung Berlin  
A. Lubinus  
Tel.: (Ch) 7449

Fachbereich 1.6  
Schall  
Dr. C. Koch  
Tel.: 1600

Fachbereich 2.6  
Elektrische  
Quantenmetrologie  
Dr. F. J. Ahlers  
Tel.: 2600

Fachbereich 3.6  
System- und  
Eigensicherheit  
Dr. U. Johannsmeyer  
Tel.: 3600

Fachbereich 4.6  
Optische Technologien  
Dr. S. Kück  
Tel.: 4500

Fachbereich 5.6  
Wissenschaftlicher  
Gerätebau  
Prof. Dr. F. Löffler  
Tel.: 5500

Fachbereich 6.6  
Grundlagen der  
Dosimetrie  
Dr. H. Rabus  
Tel.: 6600

Fachbereich 7.6  
Wärme  
Dr. T. Lederer  
Tel.: (Ch) 7230

Fachbereich 8.6  
Metrologische  
Informationstechnik  
Prof. Dr. D. Richter  
Tel.: (Ch) 7479

Referat Q.61  
Technischer Dienst  
M. Frühauf  
Tel.: 9170

Referat Z.16  
Innerer Dienst  
M. List  
Tel.: 9160

Fachbereich 1.7  
Angewandte Akustik  
Prof. Dr. W. Scholl  
Tel.: 1700

Fachbereich 2.7  
Elektrische  
Quantenmetrologie  
Dr. F. J. Ahlers  
Tel.: 2600

Fachbereich 3.7  
Zündquellenicherheit  
Dr. M. Beyer  
Tel.: 3700

Fachbereich 4.7  
Optische Technologien  
Dr. S. Kück  
Tel.: 4500

Fachbereich 5.7  
Wissenschaftlicher  
Gerätebau  
Prof. Dr. F. Löffler  
Tel.: 5500

Referat 6.71  
Betrieblicher  
Strahlenschutz  
Dr. R. Simmer  
Tel.: 6710

Fachbereich IB.T  
Technisch-wissensch.  
Infrastruktur Berlin  
Dr. F. Melchert  
Tel.: (Ch) 7446

Fachbereich 8.7  
Metrologische  
Informationstechnik  
Prof. Dr. D. Richter  
Tel.: (Ch) 7479

Referat Q.62  
Technischer Dienst  
M. Frühauf  
Tel.: 9170

Referat Z.17  
Ausbildung  
P. J. Dickens  
Tel.: 9240

Gesamtpersonalrat  
U. Meyer  
Tel.: 10 90  
Örtlicher Personalrat Braunschweig  
W. Krien  
Tel.: 1092  
Örtlicher Personalrat Berlin  
R. Thomas  
Tel.: (Ch) 7360  
Gleichstellungsbeauftragte  
B. Behrens  
Tel.: 9133  
Gesamtvertretung der Schwerbehinderten  
T. Quandt  
Tel.: 1097  
Vertretung der Schwerbehinderten Braunschweig  
T. Quandt  
Tel.: 1097  
Vertretung der Schwerbehinderten Berlin  
I. Wichmann  
Tel.: (Ch) 7448

## Deutscher Kalibrierdienst

Akkreditierungsstelle des Deutschen  
Kalibrierdienstes  
Dr. M. Wolf  
Tel.: 1950  
Aufsicht: BMWi

Benannte Stelle (Nummer 0102) nach  
EG-Richtlinien 94/9/EG, 90/384/EWG,  
2004/22/EG

Zertifizierungsstelle  
Dr. H. Stolz  
im Fachbereich Q.3  
Tel.: 8320

QUEST  
Institut an der PTB  
Prof. Dr. P. O. Schmidt  
Tel.: 4700

Personal	A-PE	Dr. Weiß	Tel.: 8010
Investitionen	A-IV	Prof. Dr. Peters	Tel.: 2000
IT-Infrastruktur	A-IT	Dr. Hackel	Tel.: 8400
Metrologische Dienstleistungen	A-MD	Prof. Dr. Peters	Tel.: 2000
Internationale Zusammenarbeit	A-IZ	Dr. Stenger	Tel.: 1009
Qualitätsmanagement	A-QM	Dr. Odin	Tel.: 8330
Forschungsprogramme	A-FP	Dr. Stenger	Tel.: 1009

**Zeichenerklärung**  
☎(0531) 592-0 Braunschweig/  
Durchwahl 592 ...  
☎(030) 3481-1 Berlin Charlottenburg  
(Ch)/Durchwahl 3481 ...  
☎(030) 3481-1 Berlin Adlershof  
(Ad)/Durchwahl 6392 ...  
\*wahrgenommen durch