

Drs. 6216-17
Halle/S. 28 04 2017

Stellungnahme zur Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB), Braunschweig und Berlin

Vorbemerkung	5
A. Kenngrößen	6
B. Aufgaben	7
C. Stellungnahme und Empfehlungen	9
 Anlage: Bewertungsbericht zur Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB), Braunschweig und Berlin	 17

Vorbemerkung

In Umsetzung des „Konzepts für eine moderne Ressortforschung“ der Bundesregierung hat das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) den Wissenschaftsrat mit Schreiben vom 26. November 2014 und ergänzendem Schreiben vom 28. Januar 2015 gebeten, die Ressortforschungseinrichtungen in seinem Geschäftsbereich einer erneuten Evaluation zu unterziehen.

Der Wissenschaftsrat hat den Evaluationsausschuss im Januar bzw. Juli 2015 gebeten, die Evaluationen durchzuführen und entsprechende Arbeitsgruppen einzusetzen. Der Evaluationsausschuss des Wissenschaftsrates hat beschlossen, das Verfahren zur Begutachtung der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) in der zweiten Jahreshälfte 2016 zu beginnen, und hat eine Arbeitsgruppe eingesetzt. In dieser Arbeitsgruppe haben auch Sachverständige mitgewirkt, die nicht Mitglieder des Wissenschaftsrates sind. Der Wissenschaftsrat ist ihnen zu besonderem Dank verpflichtet.

Die Arbeitsgruppe hat die Physikalisch-Technische Bundesanstalt vom 12. bis 14. Oktober 2016 in Braunschweig und Berlin besucht und auf der Grundlage dieses Besuchs einen Bewertungsbericht verfasst. Nach Verabschiedung durch die Arbeitsgruppe ist der Bewertungsbericht im weiteren Verfahren nicht mehr veränderbar.

Der Evaluationsausschuss des Wissenschaftsrates hat auf der Grundlage dieses Bewertungsberichts am 29. März 2017 die wissenschaftspolitische Stellungnahme erarbeitet.

Der Wissenschaftsrat hat die Stellungnahme in seinen Sitzungen vom 26. bis 28. April 2017 in Halle/S. beraten und verabschiedet.

A. Kenngrößen

Die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) ist eine rechtlich nicht selbstständige Bundesoberbehörde im Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) und zugleich nationales Metrologieinstitut. Hauptsitz der PTB ist Braunschweig, zwei weitere Standorte befinden sich in Berlin.

Die PTB geht auf die Physikalisch-Technische Reichsanstalt (PTR) zurück, die im Jahr 1887 auf Initiative von Werner von Siemens und Hermann von Helmholtz als weltweit erstes metrologisches Institut in Berlin gegründet wurde. Nach Ende des Zweiten Weltkrieges war die PTR faktisch zerschlagen. Zur Neugründung kam es auf Betreiben des Nobelpreisträgers Max von Laue im Jahr 1947 in Braunschweig. Die neue Einrichtung erhielt 1950 die Bezeichnung Physikalisch-Technische Bundesanstalt und untersteht seither der Regierung der Bundesrepublik Deutschland.

Die Gesamtausgaben der PTB beliefen sich im Haushaltsjahr 2016 auf 206,8 Mio. Euro. Davon entfielen 104,9 Mio. Euro auf Personalausgaben, 65,2 Mio. Euro auf sächliche Verwaltungsausgaben, 1,3 Mio. Euro auf Ausgaben für Zuweisungen und Zuschüsse und 35,5 Mio. Euro auf Investitionen. 73 % des Gesamtbudgets wurden für interne und externe Forschung und Entwicklung (FuE) verausgabt. Dem standen im Haushaltsjahr 2016 Einnahmen insbesondere aus der Grundfinanzierung in Höhe von 172,7 Mio. Euro gegenüber. Im Zeitraum von 2013 bis 2015 hat die PTB Drittmittel in Höhe von insgesamt 96,2 Mio. Euro vereinnahmt, darunter stammten 43,4 Mio. Euro vom Bund und 36,3 Mio. Euro von der Europäischen Union (EU). Im Jahr 2016 lag das Drittmittelvolumen bei 36,0 Mio. Euro, davon kamen knapp die Hälfte vom Bund und rund ein Drittel von der EU.

Am 31.12.2016 (Stichtag) verfügte die PTB über 1.282,5 institutionelle Stellen (Vollzeitäquivalente, VZÄ). Von den 326,0 Stellen für wissenschaftliches Personal (VZÄ) waren zum Stichtag 319,0 Stellen besetzt. Hinzu kamen 299,0 drittmittelfinanzierte Stellen (VZÄ), von denen 263,0 VZÄ befristet besetzt waren, darunter 186,0 VZÄ für Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler. Weitere 296,0 VZÄ wurden aus Aushilfsmitteln finanziert, darunter 108,0 für wissenschaftliches Personal. Insgesamt waren am Stichtag 1.928 Personen an der PTB tätig, darunter 122 Wissenschaftlerinnen und 501 Wissenschaftler.

B. Aufgaben

Laut § 2 (1) ihrer Satzung vom 15. September 2015 gehören zu den Aufgaben der Physikalisch-Technischen-Bundesanstalt:

- 1 – „die Darstellung, Bewahrung und Weitergabe der physikalischen Einheiten (Einheiten im Messwesen) zur Sicherung der nationalen und internationalen Einheitlichkeit der Maße sowie die Bestimmung von Fundamentalkonstanten;
- 2 – die wissenschaftliche Bearbeitung des 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, Mitwirkung in der Lehre, Kalibrierung, Prüfung, Konformitätsbewertung und Zulassung, Beratung und Information im Rahmen ihrer wissenschaftlich-technischen Kapazität;
- 5 – die Unterstützung der nationalen Akkreditierungsstelle sowie des Akkreditierungsbeirats und seiner Fachbeiräte bei der Wahrnehmung von deren Aufgaben nach dem Akkreditierungsgesetz, soweit dies für die Weitergabe der Einheiten erforderlich ist.“

Grundlage für diese Aufgaben ist Art. 73 (1) 4 Grundgesetz, welcher die ausschließliche Gesetzgebung des Bundes über Maße und Gewichte sowie die Zeitbestimmung festschreibt. Daraus ergibt sich die Grundbeauftragung der PTB durch § 6 Einheiten- und Zeit-Gesetz (EinhZeitG) sowie §§ 45 bis 47 Mess- und Eichgesetz (MessEG), in denen die Aufgaben im Einzelnen aufgeführt sind. Nach dem Einheiten- und Zeit-Gesetz obliegt es der PTB etwa, „die gesetzlichen Einheiten darzustellen, weiterzugeben und die dafür benötigten Verfahren weiterzuentwickeln, die gesetzliche Zeit darzustellen und zu verbreiten [und] die Temperaturskala nach der Internationalen Temperaturskala der Internationalen Meterkonvention darzustellen und weiterzugeben.“ |¹ Weiterhin hat die PTB laut Einheiten- und Zeit-Gesetz die Aufgabe, „das Messwesen wissenschaftlich zu bearbeiten, insbesondere Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet des Messwesens zu betreiben, Prüfungen und Untersuchungen auf dem

|¹ § 6 (2) EinhZeitG.

Gebiet des Messwesens vorzunehmen, den Wissens- und Technologietransfer auf diesem Gebiet zu fördern [und] zur Einheitlichkeit des internationalen Messwesens beizutragen.“ |² Darüber hinaus hat die PTB laut Mess- und Eichgesetz die Aufgabe, zur Sicherung der Einheitlichkeit des gesetzlichen Messwesens „die für die Durchführung dieses Gesetzes zuständigen Landesbehörden zu beraten, naturwissenschaftlich-technische Fragestellungen des gesetzlichen Messwesens wissenschaftlich zu bearbeiten, insbesondere wissenschaftliche Forschung auf diesem Gebiet zu betreiben [und] die Normung und Standardisierung auf diesem Gebiet zu unterstützen.“ |³

Überdies vertritt die PTB laut § 2 ihrer Satzung „die Bundesrepublik Deutschland auf den ihr durch Gesetz übertragenen Aufgabengebieten gegenüber Einrichtungen des Auslands und internationalen Organisationen in fachlichen Fragen“ und „berät und unterstützt die Bundesregierung bei wissenschaftlich-technischen Fragen auf ihren Aufgabengebieten.“

| ² § (3) EinZeitG.

| ³ § 45 MessEG.

C. Stellungnahme und Empfehlungen

Die PTB zählt zu den weltweit führenden Metrologieinstituten. Ihre zentralen Aufgaben der Darstellung, Bewahrung und Weitergabe physikalischer Einheiten zur Sicherung der internationalen Einheitlichkeit der Maße erfüllt die PTB insgesamt in sehr guter, größtenteils exzellenter Qualität. Besonders hervorzuheben ist ihre Leistungsstärke im Kernbereich der metrologischen Forschung „Zeit und Frequenz“, Quantenmetrologie, Terahertz-Messtechnik und Neubestimmung der SI-Einheiten |⁴, auf der ihre führende Rolle maßgeblich beruht. Überdies erbringt die PTB wissenschaftsbasierte Dienstleistungen von großer wirtschaftlicher Relevanz im Bereich der Standardisierung, Normung und Qualitätssicherung. Ihre systematische und engagierte Arbeit in nationalen, europäischen und internationalen Gremien wird sehr geschätzt. Dabei gelingt es der Bundesanstalt, nationalen industriellen Standards und Verfahren auch internationale Gültigkeit zu verschaffen, aktuell etwa im Bereich der Sensorik und Strahlungsthermometrie. Insgesamt zeichnet sich die PTB durch eine strategische Stringenz von der Grundlagenforschung bis zur Anwendung aus, die es ihr erlaubt, gesetzliche Aufgaben und aufgabenbezogene Forschung sehr schlüssig zu verknüpfen. Aufgrund ihres insgesamt sehr hohen Leistungsniveaus genießt die PTB national wie international hohe fachliche Anerkennung.

Im Zuge der Digitalisierung der Wirtschaft (virtuelle Nutzung von Ressourcen wie bspw. Datenströme, Industrie 4.0, Internet der Dinge etc.) sollte die PTB eine führende Rolle in der Metrologie für Internet- und Digitalisierungsmessgrößen übernehmen. Dies gilt vor allem für die Bereiche Messwesen sowie Referenzgrößen in der Informationstechnik. Zwar gibt es eine Reihe von internationalen Standardisierungsorganisationen |⁵, eine der PTB in der Messtechnik entsprechende Autorität fehlt jedoch in einer zunehmend vernetzten und digitalisierten Welt.

| ⁴ *Système international d'unités* (SI): Internationales Einheitensystem für physikalische Größen.

| ⁵ Hierzu gehören beispielsweise: *International Telecommunication Union* (ITU) / *ITU Telecommunication Standardization Sector* (ITU-T); *Internet Engineering Task Force* (IETF); *Internet Corporation for Assigned Names and Numbers* (ICANN); *European Telecommunications Standards Institute* (ETSI).

Daher werden die Aktivitäten der PTB zum Aufbau der Metrologie für die Digitalisierung mit großem Nachdruck unterstützt. Die vorgesehene Stärkung der „Metrologischen Informationstechnik“ mittels einer Juniorprofessur für „Sichere und vertrauenswürdige netzangebundene Systemarchitekturen“ zusammen mit der TU Berlin ist ein wichtiger Schritt. Aufgrund der hochdynamischen Entwicklung der Forschungs- und Technologiefelder reicht dieser allerdings bei Weitem nicht aus. Vielmehr ist es zwingend notwendig, die Aktivitäten in diesem Feld zusätzlich zum bisherigen Portfolio der Bundesanstalt mit hoher Priorität auszubauen. Empfohlen wird der zügige Aufbau mindestens eines Arbeitsbereichs für die digitale Fertigungsmesstechnik (Metrologie im *Smart Manufacturing*). Zur Beratung bei der Entwicklung einer Digitalisierungsstrategie sollte die PTB ein Expertengremium etablieren.

Die Komplexität dieser Themenstellung erfordert eine präzise Aufgabenbestimmung für die PTB auch in Abgrenzung zu weiteren relevanten Einrichtungen auf diesem Gebiet. Insbesondere ist auf eine klare Aufgabentrennung zwischen der PTB und dem Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI) zu achten. Empfohlen wird, der PTB eine Zuständigkeit für die Erarbeitung von Messarchitekturen und Standardisierungsprozesse zuzuordnen.

Zu Forschung und Dienstleistungen

Forschungsstrategische Prozesse haben in der PTB einen erkennbar hohen Stellenwert; die im Rahmen der Anforderungen an eine Ressortforschungseinrichtung vorhandenen Möglichkeiten werden hier auf vorbildliche Weise genutzt. Dies zeigt sich insbesondere an einer kriteriengestützten Aufgabepriorisierung für das Arbeits- und Forschungsprogramm. Es gelingt der PTB, durch kluges Veränderungsmanagement neue Bereiche wie die Nanometrologie aufzubauen und bestehende Bereiche, beispielsweise die Tiefsttemperaturmesstechnik, aufzugeben.

Besonders positiv bewertet wird die Strategieplanung in den Themenbereichen der Quantenmetrologie, der Metrologie für den Energiesektor und für die Biomedizin bzw. Biotechnologie. Die Vorlaufforschung zur Quantenmetrologie, insbesondere in Verbindung mit Nanometrologie ist sehr gut aufgestellt und drittmittelstark. Auch in der Metrologie für den Energiesektor ist die PTB auf einem sehr guten Weg. Die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zu biomedizinischen Messverfahren sind sehr gut eingebunden in Kooperationen mit medizinischen Partnern. Da sich zukünftige Bedarfe in grundlegenden (bio-)medizinischen Messverfahren gegenwärtig nicht exakt abschätzen lassen, sollte die PTB ihre Forschungsstrategie in dieser Hinsicht regelmäßig aktualisieren.

Eine zentrale Anforderung mit hohem Handlungsdruck stellt die Metrologie für die fortschreitende Digitalisierung dar. Referenz-Messgrößen werden für die digitalisierte Wirtschaft immer wichtiger, die Nachfrage nach Kalibrierun-

gen von digitalen Systemen wird angesichts der dynamischen Entwicklung *Cloud*-basierter Dienste zunehmend dringlicher. Insgesamt muss eine Vergleichbarkeit neuer Internetsysteme und Internetdienste erreicht und gewährleistet werden. Bei der PTB sollten insbesondere Dienstgütemessungen für den Test digitaler Systeme, die Emulation von Datenverkehrsströmen, die Untersuchung von gemischten multimedialen Anwendungen und deren Zertifizierungsprozesse in der *Cloud* angesiedelt werden.

Die Bedeutung von Forschung und Methodenentwicklung für die Dienstleistungen der PTB ist außergewöhnlich hoch, die Angebote und Leistungen selbst von ausgezeichneter Qualität. In der Politikberatung kommt der PTB eine Schlüsselposition zu, beispielsweise bei der Vorbereitung neuer Themenfelder. Sehr positiv bewertet wird das proaktive Engagement der PTB bei der Sensibilisierung für zukunftsrelevante Themen, wie etwa die bereits angesprochene Digitalisierung. Künftig sollte die PTB noch stärker in den politischen Beratungs- und Planungsprozess einbezogen werden. Wichtige Themen sind neben der metrologischen Informationstechnik aktuell die Nanometrologie und Nanotechnologie. Dass die PTB und weitere Ressortforschungseinrichtungen auch aus anderen Ressorts sich auf eine gemeinsame Strategie zur Nanotechnologie verständigt haben, ist sehr begrüßenswert. Überdies wird angeraten, die PTB vorausschauend in die weitere Entwicklung des biotechnologischen Bereichs einzubinden, auch wenn der PTB hier keine tragende Rolle zukommt.

Dem breit gefächerten Aufgabenportfolio entsprechend verfügt die PTB über unterschiedliche Publikationsformate; neben wissenschaftlichen Beiträgen werden beispielsweise Regelwerke, Prüf- und Analyseberichte, Zertifizierungen etc. erarbeitet, die sich an unterschiedliche nationale und internationale Zielgruppen richten. Für diese erforderliche Bandbreite sollte die PTB eine ihren Aufgaben und Adressaten gerechte Publikationsstrategie entwickeln. Die wissenschaftliche Publikationstätigkeit der PTB wird insgesamt als gut bis sehr gut bewertet, in einigen Bereichen kann sie auch Spitzenpublikationen vorweisen. Seit der zurückliegenden Evaluation des Wissenschaftsrates ist hier eine erkennbar positive Entwicklung zu verzeichnen. Auf dieser Grundlage sollte die PTB ihre Anstrengungen im wissenschaftlichen Bereich auch weiterhin auf die Erarbeitung qualitativ hochwertiger Publikationen in referierten Zeitschriften konzentrieren. Im Rahmen der Publikationsstrategie sollten zudem Veröffentlichungen in *Open Access* unterstützt und eine *Open Data Policy* verfolgt werden.

Auch für die interessierte Fachöffentlichkeit stellt die PTB Informationen bereit und setzt hierbei geeignete moderne Medien ein. Bedenkenswert wäre die Entwicklung einer Kommunikationsstrategie darüberhinausgehend für spezifische Adressatenkreise wie Studierende oder besonders auch den Bundestag und die Länderparlamente.

Die PTB verfügt über ein vielfältiges Portfolio von Drittmittelaktivitäten. Sehr positiv zu bewerten ist der Umfang der Drittmiteleinahmen in Höhe von insgesamt rund 96 Mio. Euro im Erhebungszeitraum 2013 bis 2015, bemerkenswert ist der hohe Anteil (38 %) an EU-Drittmittel. Mit Nachdruck wird die gestaltende Rolle der PTB auf europäischer Ebene gewürdigt, nur auf diese Weise lässt sich ihre aufgabenbezogene Forschung überhaupt realisieren. Das Verhältnis von Grundfinanzierung und Drittmiteleinahmen |⁶ wird noch als angemessen angesehen, der Drittmittelanteil sollte jedoch nicht weiter steigen. Einzelne Bereiche, beispielsweise Dosimetrie und CT, richten ihre Drittmittelaktivitäten im Wesentlichen auf die Industrie und sollten künftig auch die Einwerbung von Drittmitteln in Kooperation mit Hochschulen verstärken.

Das Engagement der PTB zur Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses hat sich seit der zurückliegenden Evaluation sehr gut entwickelt. |⁷ Ein wesentlicher Eckpunkt hierfür ist das eigene Doktorandenkonzept, in dem sich die PTB selbst auf Regelungen für gute Betreuungsbedingungen insbesondere durch ein Mentorat, die Förderung der Teilnahme an Fachveranstaltungen sowie das Angebot eines Kern-Curriculums verpflichtet. Zudem soll damit eine bessere Vernetzung der Promovierenden untereinander unterstützt werden. Ebenfalls positiv zu vermerken ist die Mitwirkung der PTB im Graduiertenkolleg 1729 „Grundlagen und Anwendungen ultrakalter Materie“ der Universität Hannover sowie in der Braunschweig *International Graduate School of Metrology* (BIGSM). Eine durchschnittliche Promotionsdauer von 4,5 Jahren erscheint angesichts der guten Betreuungssituation und ohne die obligatorischen Aufgaben in der Lehre besonders im Vergleich zu den Universitäten allerdings als zu hoch. Das Bestreben der PTB, die durchschnittliche Promotionsdauer auf drei Jahre zu senken, wird daher ausdrücklich unterstützt. Ebenfalls gewürdigt werden die Gleichstellungsbemühungen der PTB. Die Bundesanstalt wird darin bestärkt, die selbst gesteckten Ziele, besonders auch im Rahmen der Nachwuchsförderung, konsequent weiter zu verfolgen.

Die PTB genießt hohe Wertschätzung in der wissenschaftlichen Fachgemeinschaft und ist sehr gut vernetzt mit universitären und außeruniversitären Forschungseinrichtungen im In- und Ausland. Besonders hervorzuheben ist die intensive Zusammenarbeit der PTB in europäischen Forschungsprogrammen und wissenschaftlichen Netzwerken auf europäischer Ebene, oftmals in leitender Funktion. Anzuführen sind hier beispielsweise das Forschungsprogramm

|⁶ Im Haushaltsjahr 2015 verfügte die PTB über eine Grundfinanzierung in Höhe von rund 173 Mio. Euro (Soll) und über Drittmiteleinahmen von rund 28 Mio. Euro.

|⁷ Von 29 Promovierenden im Jahr 2004 und 67 im Jahr 2007 ist die Anzahl auf ca. 150 im Jahr 2016 angestiegen.

EMRP und das Nachfolgeprogramm EMPIR. |⁸ Die strategisch vernetzte Verbundforschung in den europäischen Metrologieprogrammen wird als außerordentlich wichtig betrachtet, um europarelevante Interessengebiete fachspezifisch zu bündeln und längerfristig zu bearbeiten.

Im regionalen Kontext ist die PTB mit der TU Braunschweig über zwei gemeinsame Berufungen und gemeinsame Aktivitäten in Forschung, Lehre und Nachwuchsförderung eng verbunden. Dass die Metrologie seit kurzem zu den insgesamt vier Forschungsschwerpunkten der TU Braunschweig gehört, ist eine sehr positive Entwicklung und unterstreicht die enge Kooperation beider Einrichtungen. Diese thematische Fokussierung und Verknüpfung von Ressourcen wird ausdrücklich unterstützt. Zudem kooperiert die PTB eng mit der Universität Hannover, vor allem im Bereich der Quantentechnologie, und auch mit der Charité Berlin im Bereich der Medizinphysik. In weiteren Bereichen, z. B. Dosimetrie und CT, wird eine Intensivierung der Zusammenarbeit mit Hochschulen empfohlen. Die PTB sollte die Kooperation mit den jeweils fachlich bestmöglichen Partnern noch gezielter anstreben.

Sehr positiv hervorzuheben ist die technische Zusammenarbeit der PTB mit Partnern in Transformations-, Schwellen- und Entwicklungsländern. Der zuständige Bereich in der PTB leistet mit großem Engagement anspruchsvolle Aufbauarbeit von sehr hoher Qualität. Besonders stark eingebunden ist der Bereich in die Aktivitäten des Bundesministeriums für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (BMZ). Ungeachtet der systematischen Einbeziehung in die langfristig angelegten und regelmäßig wiederkehrenden Aufgaben der Entwicklungsarbeit arbeitet der Bereich im Wesentlichen auf Projektbasis. Die Beschäftigungsverhältnisse der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter sind größtenteils drittmittelfinanziert, davon über die Hälfte befristet. Dieser Anteil wird als zu hoch betrachtet und ist angesichts der kontinuierlichen Aufgaben in der technischen Zusammenarbeit nur bedingt nachvollziehbar und angemessen. Unabhängig davon sollte die strategische Ausrichtung der technischen Zusammenarbeit in der PTB weiter geschärft werden.

Die Transferanstrengungen der PTB, die maßgeblich zur Weltmarktstellung unter anderem der optischen Industrie Deutschlands beitragen, sind beispielgebend. Die vielfältigen Kooperationen der PTB mit der Industrie stellen einen wichtigen Weg des Technologietransfers dar. Die Einrichtung pflegt einen sehr intensiven Austausch mit Fachverbänden und Netzwerken mit anwendungsorientierter Ausrichtung, die für den Technologietransfer eine zentrale Rolle spielen. Besonders hervorzuheben sind die Beiträge zum Wissenstransfer, den die PTB im Rahmen ihrer Aktivitäten zur Regelsetzung und Normung leistet.

|⁸ EMRP - *European Metrology Research Programme*; EMPIR - *European Metrology Programme for Innovation and Research*.

Ein Schwerpunkt ihrer Beratungsleistungen liegt in der Mitarbeit in mehr als 400 Normungsgremien auf nationaler und internationaler Ebene.

Zu Organisation und Ausstattung

Die Organisationsstruktur der PTB ist adäquat und gut geeignet, um die umfassenden, überwiegend gesetzlichen Aufgaben reibungslos zu bewältigen. Die Ergänzung der traditionellen Abteilungsorganisation um matrixartige Strukturen ist schlüssig und erlaubt eine umfangreiche programmorientierte Steuerung. Die PTB wird darin unterstützt, den eingeschlagenen Weg fortzuführen.

Das traditionsreiche Kuratorium der PTB, dem namhafte Vertreterinnen und Vertreter aus Wissenschaft und Wirtschaft angehören, übernimmt eine strategisch wichtige Schnittstellenfunktion. Größe und Zusammensetzung erlauben dem Gremium, seinen wissenschaftlichen Beratungsauftrag durch Einbeziehung von wissenschaftlicher Kompetenz und internationaler Perspektive zu erfüllen.

Der zwingend notwendige Aufbau der Metrologie für die Digitalisierung erfordert, wie bereits ausgeführt, eine klare Beauftragung der PTB. Der eingeleitete Prozess der interministeriellen Abstimmung wird daher begrüßt. Aufgrund der hochdynamischen Thematik wird jedoch eine Beschleunigung der Abstimmungsprozesse für dringend erforderlich gehalten.

Die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter der PTB schätzen das angenehme Arbeitsklima, die flexiblen und familienfreundlichen Arbeitszeitregelungen, die sehr guten Möglichkeiten der persönlichen Weiterentwicklung und fachlichen Fortbildung sowie die offene Kommunikationskultur. In allen Bereichen ist eine sehr hohe Motivation und Begeisterung der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter für ihre Arbeit sowie insgesamt eine hohe Identifikation mit der Arbeitgeberin PTB wahrzunehmen.

Die Gewinnung von geeignetem Leitungspersonal stellt die PTB – wie andere Einrichtungen der Ressortforschung auch – vor allem aufgrund der finanziellen Rahmenbedingungen zunehmend vor Schwierigkeiten. Im Rahmen der Bundesbesoldungsordnung sind Gewinnungs- und Leistungszulagen, die zur Anhebung von Gehältern gewährt werden können, zeitlich befristet. Die Rekrutierung von hochqualifizierten Personen erfordert jedoch attraktive und gesicherte finanzielle Regelungen. Eine Verstetigung der Zulagen wird als notwendig erachtet, damit die PTB mittel- und längerfristig im Wettbewerb um die „besten Köpfe“ mit universitären und außeruniversitären Forschungseinrichtungen sowie Industrieunternehmen konkurrenzfähig sein kann. Überdacht werden sollte ferner die (zweijährige) Probezeitregelung, die bei einer Neubesetzung des Präsidentenamtes vorgesehen ist.

Für den Aufbau neuer Strukturen auf dem Gebiet der metrologischen Informationstechnik benötigt die PTB entsprechende Kompetenzen. Diese lassen sich

vermutlich nicht vollständig aus dem vorhandenen Personal zusammenstellen, daher ist eine Erweiterung des informationstechnischen Kompetenzportfolios in Verbindung mit einer geeigneten Nachwuchsförderung unverzichtbar. Da diese Anforderung bereits für die Vorbereitung der Prozesse gilt, wird ein entsprechend großer Handlungsbedarf gesehen.

Die finanzielle Lage der PTB ist gegenwärtig solide. Durch die Anwendung dem Wissenschaftsfreiheitsgesetz entsprechender Flexibilisierungen verfügt sie auch über die für eine Wissenschaftseinrichtung sinnvolle haushälterische Flexibilität. Vor dem Hintergrund der umfangreichen Aufgaben und des notwendigen Aufbaus zukunftsorientierter neuer Themenfelder wird allerdings mit großer Sorge betrachtet, dass der Haushalt ab 2016 nicht in ausreichendem Umfang anwächst. Um das erreichte hohe Qualitätsniveau halten zu können, ist bereits zum jetzigen Zeitpunkt eine Angleichung erforderlich, der Mittelbedarf wird sich künftig durch die Übernahme neuer Aufgaben noch weiter erhöhen. Eine zukunftsfeste Position der PTB im internationalen Wettbewerb erfordert einen gesicherten finanziellen Aufwuchs über mehrere Jahre und gezielte zusätzliche Investitionen für den Aufbau neuer relevanter Themengebiete. Bei der Übernahme neuer gesetzlicher Aufgaben sollten künftig grundsätzlich die dafür erforderlichen personellen Ressourcen in der Grundfinanzierung abgedeckt werden.

Für die Erfüllung der derzeitigen Aufgaben verfügt die PTB insgesamt über eine wissenschaftlich kompetitive Infrastrukturausstattung. Die PTB-eigene *Metrology Light Source*, die Elektronenbeschleunigeranlage für die Dosimetrie in der Strahlentherapie, das Reinraumzentrum und die Kraft- und Drehmoment-Normalmessenrichtungen sind nur einige prominente Beispiele der hervorragenden, teilweise weltweit einzigartigen Forschungsinfrastruktur. Dass die PTB ihre größeren Mess- und Forschungseinrichtungen externen Nutzerinnen und Nutzern anbietet, ist sehr begrüßenswert. Die Gebäudesituation ist derzeit im Wesentlichen noch als gut zu bewerten. Sehr begrüßenswert ist das Programm (Liegenschaftskonzept und Masterplan) zur notwendigen Modernisierung und zum Ausbau der Gebäude bis zum Jahr 2035 in einem Gesamtumfang von 332 Mio. Euro. Dabei sollte auf ausreichend Flexibilität bei der Durchführung der Baumaßnahmen sowie auf angemessene Kapazitäten in der staatlichen Bauverwaltung geachtet werden, um der PTB möglichst reibungslose Arbeitsabläufe zu ermöglichen.

Der Wissenschaftsrat bittet das BMWi zeitnah, spätestens in drei Jahren, über die Umsetzung der Empfehlungen zu berichten.

Anlage: Bewertungsbericht
zur **Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB)**,
Braunschweig und Berlin

2017

Drs. 5414-16
Köln 10 03 2017

Vorbemerkung	21
A. Ausgangslage	22
A.I Entwicklung und Aufgaben	22
I.1 Entwicklung	22
I.2 Aufgaben	23
I.3 Positionierung der PTB im fachlichen Umfeld	25
A.II Arbeitsschwerpunkte	27
II.1 Forschung und Entwicklung	27
II.2 Wissenschaftsbasierte Dienstleistungen, Beratungs- und Informationsleistungen	48
II.3 Kooperationen	52
II.4 Qualitätssicherung	55
A.III Organisation und Ausstattung	57
III.1 Organisation	57
III.2 Ausstattung	59
A.IV Künftige Entwicklung	65
B. Bewertungsbericht	68
B.I Bedeutung und Entwicklung	68
B.II Arbeitsschwerpunkte	69
II.1 Forschung und Entwicklung	69
II.2 Wissenschaftsbasierte Dienstleistungen, Beratungs- und Informationsleistungen	87
II.3 Kooperationen	89
II.4 Qualitätssicherung	90
B.III Organisation und Ausstattung	90
III.1 Organisation	90
III.2 Ausstattung	91
Anhang	93

Vorbemerkung

Der vorliegende Bewertungsbericht zur Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) ist in zwei Teile gegliedert. Der darstellende Teil ist mit der Einrichtung und dem Zuwendungsgeber abschließend auf die richtige Wiedergabe der Fakten abgestimmt worden. Der Bewertungsteil gibt die Einschätzung der wissenschaftlichen Leistungen, Strukturen und Organisationsmerkmale wieder.

A. Ausgangslage

A.1 ENTWICKLUNG UND AUFGABEN

I.1 Entwicklung

Die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) ist eine rechtlich nicht selbstständige Bundesoberbehörde im Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) und zugleich nationales Metrologieinstitut. Hauptsitz der PTB ist Braunschweig, zwei weitere Standorte befinden sich in Berlin-Charlottenburg und Berlin-Adlershof.

Die PTB geht auf die Physikalisch-Technische Reichsanstalt (PTR) zurück, die im Jahr 1887 auf Initiative von Werner von Siemens und Hermann von Helmholtz als weltweit erstes metrologisches Institut in Berlin gegründet wurde. Von Beginn an prägte die enge Verbindung von Forschung und Entwicklung (FuE) einerseits und Industrie andererseits das Profil der Einrichtung. Waren beide Ausrichtungen, die wissenschaftliche und die industrielle, in den Anfangsjahrzehnten noch in zwei getrennten Abteilungen – einer physikalischen und einer technischen – verortet, erfolgte nach der Wende zum 20. Jahrhundert eine Reorganisation der PTR in fachlich ausgerichtete Abteilungen (z. B. Optik, Elektrizität, Wärme), die jeweils Physik und Technik umfassten; diese Struktur besteht im Grundsatz bis heute, wurde inzwischen allerdings durch abteilungsübergreifende Themenbereiche matrixartig ergänzt. Im Jahr 1923 wurde die Reichsanstalt für Maß und Gewicht in die PTR integriert. In der Zeit des Nationalsozialismus war die PTR wissenschaftlich durch die „Deutsche Physik“ geprägt und stellte sich in den Dienst der militärischen Aufrüstung. |⁹ Während des Zweiten Weltkrieges und der Bombardierung Berlins mussten

|⁹ Weitgehend auf Deutschland begrenzt, richtete sich die „Deutsche Physik“ mit ihrer ausgeprägten antisemitischen Stoßrichtung gegen moderne, vielfach von jüdischen Wissenschaftlern angestoßene Entwicklungen der Physik wie etwa die Relativitätstheorie und die Quantenmechanik. Diesen als zu stark mathematisch-theoretisch empfundenen Ansätzen gegenüber machte sie sich für die experimentelle Physik stark, die sie aufgrund ihrer Anschaulichkeit und intuitiven Nachvollziehbarkeit für überlegen hielt. Zu den Protagonisten der „Deutschen Physik“ gehörte der Nobelpreisträger Johannes Stark, der von 1933 bis 1939 Präsident der PTR und von 1934 bis 1936 zugleich Präsident der Deutschen Forschungsgemeinschaft war. Derzeit entsteht am Max-Planck-Institut für Wissenschaftsgeschichte eine Studie über die PTR im Nationalsozialismus.

mehrere Abteilungen an verschiedene andere Standorte verlegt werden, etwa nach Thüringen; 1945 war die PTR faktisch zerschlagen.

Zur Neugründung kam es auf Betreiben des Nobelpreisträgers Max von Laue im Jahr 1947 in Braunschweig. Die neue Einrichtung erhielt 1950 die Bezeichnung Physikalisch-Technische Bundesanstalt und untersteht seither der Regierung der Bundesrepublik Deutschland. 1953 wurde die in den wiederhergestellten Gebäuden und Laboratorien in Berlin-Charlottenburg als Dienststelle des Senats von Westberlin betriebene PTR als „Institut Berlin“ in die PTB integriert. In den folgenden Jahrzehnten wuchsen Haushalt, Personal und wissenschaftliche sowie Dienstleistungsaufgaben der Einrichtung kontinuierlich an. Der signifikante Anstieg von Kalibrierungsnachfragen aus der deutschen Industrie führte 1977 zur gemeinsam von Staat und Wirtschaft betriebenen Gründung des Deutschen Kalibrierdienstes (DKD) für die staatlich zertifizierte Kalibrierung von Normalen und Messgeräten. |¹⁰ Im Jahr 1990 übernahm die PTB den Standort Berlin-Friedrichshagen mit mehr als 400 Beschäftigten und einem Großteil der messtechnischen Aufgaben des „Amtes für Standardisierung, Meßwesen und Warenprüfung“ der ehemaligen DDR. |¹¹ Nach diesem deutlichen Personalaufwuchs, unterlag die PTB von 1993 bis 2014 der gesetzlichen Stelleneinsparung und musste ihren Personalbestand kontinuierlich reduzieren. Zugleich nahmen ihre wissenschaftlichen und Dienstleistungsaufgaben auf nationaler, europäischer und internationaler Ebene ebenso weiter zu wie die Vernetzung der Einrichtung. So brachte die PTB gemeinsam mit 22 europäischen Partnerinstituten im Jahr 2007 das europäische Metrologieforschungsprogramm (EMRP) auf den Weg und im Anschluss daran das Europäische Metrologieprogramm für Innovation und Forschung (EMPIR), die beide von der EU kofinanziert werden.

1.2 Aufgaben

Laut § 2 (1) ihrer Satzung vom 15. September 2015 gehört zu den Aufgaben der PTB:

1 – „die Darstellung, Bewahrung und Weitergabe der physikalischen Einheiten (Einheiten im Messwesen) zur Sicherung der nationalen und internationalen Einheitlichkeit der Maße sowie die Bestimmung von Fundamentalkonstanten;

|¹⁰ Der DKD war bis 2009 eine als Teil der PTB betriebene Akkreditierungsstelle, die privatwirtschaftliche Laboratorien akkreditierte, welche selbständig Kalibrierungen für die Industrie ausführten. Aufgrund von europarechtlichen Regelungen wurde die Akkreditierungsstelle des DKD mit Wirkung vom 17.12.2009 in die Deutsche Akkreditierungsstelle GmbH (DAkkS) überführt. Dadurch hat sich die Rechtsnatur des DKD geändert. Heute sichert der DKD die Zusammenarbeit von akkreditierten Kalibrierlaboratorien mit der PTB, um messtechnischen Grundlagen für Kalibrierungen zu erarbeiten. Mit der Leitung dieses Gremiums trägt die PTB zur Einheitlichkeit im Messwesen bei, für die sie nach dem Einheiten und Zeitgesetz (EinhZeitG) zuständig ist.

|¹¹ Der Standort Berlin-Friedrichshagen wurde in den Folgejahren aus wirtschaftlichen Gründen schrittweise wieder aufgegeben.

2 – die wissenschaftliche Bearbeitung des 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, Mitwirkung in der Lehre, Kalibrierung, Prüfung, Konformitätsbewertung und Zulassung, Beratung und Information im Rahmen ihrer wissenschaftlich-technischen Kapazität;

5 – die Unterstützung der nationalen Akkreditierungsstelle sowie des Akkreditierungsbeirats und seiner Fachbeiräte bei der Wahrnehmung von deren Aufgaben nach dem Akkreditierungsstellengesetz, soweit dies für die Weitergabe der Einheiten erforderlich ist.“

Grundlage für diese Aufgaben ist Art. 73 (1) 4 Grundgesetz, welcher die ausschließliche Gesetzgebung des Bundes über Maße und Gewichte sowie die Zeitbestimmung festschreibt. Daraus ergibt sich die Grundbeauftragung der PTB durch § 6 Einheiten- und Zeit-Gesetz (EinhZeitG) sowie §§ 45-47 Mess- und Eichgesetz (MessEG), in denen die Aufgaben im Einzelnen aufgeführt sind. Nach dem EinhZeitG obliegt es der PTB etwa, „die gesetzlichen Einheiten darzustellen, weiterzugeben und die dafür benötigten Verfahren weiterzuentwickeln, die gesetzliche Zeit darzustellen und zu verbreiten [und] die Temperaturskala nach der Internationalen Temperaturskala der Internationalen Meterkonvention darzustellen und weiterzugeben.“ |¹² Weiterhin hat die PTB laut EinhZeitG die Aufgabe, „das Messwesen wissenschaftlich zu bearbeiten, insbesondere Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet des Messwesens zu betreiben, Prüfungen und Untersuchungen auf dem Gebiet des Messwesens vorzunehmen, den Wissens- und Technologietransfer auf diesem Gebiet zu fördern [und] zur Einheitlichkeit des internationalen Messwesens beizutragen.“ |¹³ Darüber hinaus hat die PTB laut MessEG die Aufgabe, zur Sicherung der Einheitlichkeit des gesetzlichen Messwesens „die für die Durchführung dieses Gesetzes zuständigen Landesbehörden zu beraten, naturwissenschaftlich-technische Fragestellungen des gesetzlichen Messwesens wissenschaftlich zu bearbeiten, insbesondere wissenschaftliche Forschung auf diesem Gebiet zu betreiben [und] die Normung und Standardisierung auf diesem Gebiet zu unterstützen.“ |¹⁴

Insgesamt sind der PTB 68 Aufgaben auf der Basis von Gesetzen oder Verordnungen übertragen, darunter viele mit ausschließlicher Zuständigkeit oder im

| ¹² § 6 (2) EinhZeitG.

| ¹³ § 6 (3) EinhZeitG.

| ¹⁴ § 45 MessEG.

Sinne einer „Auffangkompetenz“ für den Fall, dass ein ausreichender Wettbewerb privater Stellen nicht vorhanden ist. Zu den Aufgaben gehören etwa Maßnahmen zur Vereinheitlichung der Regelungen für das Inverkehrbringen von Messgeräten, die Prüfung und Bauart-Zulassung von zivilen Feuerwaffen und Schussapparaten, die Sicherung der Einheitlichkeit des Messwesens in der Heilkunde und die gutachterliche Bewertung von Medizinprodukten mit Messfunktion, die Zulassung von Spielgeräten mit Gewinnmöglichkeit und die Qualitätssicherung des Strahlenschutzes und der Überwachung der Radioaktivität in der Umwelt durch Bereitstellung von Aktivitätsnormalen, Zulassungen, Bauartprüfungen und Durchführung von Ringversuchen und Kontrollmessungen. Im Bereich des Strahlenschutzes stimmt sich die PTB mit dem Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) gemäß der jeweiligen detailliert beschriebenen gesetzlichen Beauftragungen ab.

Überdies vertritt die PTB laut § 2 ihrer Satzung „die Bundesrepublik Deutschland auf den ihr durch Gesetz übertragenen Aufgabengebieten gegenüber Einrichtungen des Auslands und internationalen Organisationen in fachlichen Fragen“ und „berät und unterstützt die Bundesregierung bei wissenschaftlich-technischen Fragen auf ihren Aufgabengebieten.“

Nach Schätzung der PTB wendet ihr wissenschaftliches Personal 60 % seiner Arbeitszeit für eigene FuE-Arbeiten auf, 20 % für Dienstleistungen für die Ressorts, Dritte und die Öffentlichkeit, |¹⁵ 18 % für Überwachungs-, Prüf-, Kontroll- und Untersuchungsaufgaben auf der Grundlage von Gesetzen und Verordnungen und 2 % für die Beratung insbesondere der Europäischen Kommission, des BMWi und weiterer Bundesressorts sowie für die Beschaffung und Bereitstellung von Informationen. Aufgaben im Bereich der gewerblichen Ausbildung nehmen weniger als 1 % der Arbeitszeit des wissenschaftlichen Personals in Anspruch. Die PTB erachtet diese Gewichtung der Aufgaben als angemessen.

1.3 Positionierung der PTB im fachlichen Umfeld

Als nationales Metrologieinstitut ist die PTB als einzige Einrichtung für die vom Gesetzgeber definierten Hauptaufgaben (vgl. A.I.2) zuständig. Daher gibt es der PTB zufolge in Deutschland keine vergleichbare Einrichtung. Weltweit unterhalte nahezu jedes Land ein eigenes nationales Metrologieinstitut. Als die drei gemessen an Größe und Aufgabenspektrum wichtigsten und am ehesten mit der Bundesanstalt vergleichbaren Einrichtungen nennt die PTB:

| ¹⁵ Hierzu gehören messtechnische Leistungen, die nicht gesetzlich vorgeschrieben sind, die Mitarbeit in nationalen und internationalen Normungsgremien sowie Beratungsleistungen für die Wirtschaft.

- _ das *National Institute of Standards and Technology* (NIST), USA, das in jüngerer Zeit erhebliche Zuwächse verzeichnet habe. So sei ein hochmodernes Zentrum für Nanotechnologie zur Unterstützung der (mittelständischen) Industrie aufgebaut sowie die traditionell starke Metrologie in der Chemie weiter gestärkt und in Zusammenarbeit mit Universitäten signifikant um die Bereiche Biochemie und Biomedizin erweitert worden. Das NIST engagiere sich vermehrt in der Forensik, habe die Quantenmetrologie weiter gestärkt und im Bereich der Datensicherheit zunehmend eine koordinierende Rolle in den USA übernommen.
- _ das *National Physical Laboratory* (NPL), Großbritannien, das sich nach einer zeitweiligen Konzentration auf Dienstleistungen neuerdings bei stagnierendem Etat wieder stärker auf metrologische Grundlagenforschung, insbesondere auf die Bereiche Nano- und Quantentechnologien, rückbesinne. Diese Entwicklung werde durch eine neue Governancestruktur unterstützt, in der neben der Regierung die Industrie und zwei Universitäten die wesentlichen Stakeholder seien.
- _ das *National Metrology Institute of Japan* (NMIJ).

Die drei genannten und auch andere weltweit führende Metrologieinstitute setzen einen vergleichbaren relativen Anteil ihres Budgets für Forschung und Entwicklung ein. Im europäischen und internationalen Vergleich der nationalen Metrologieinstitute beansprucht die PTB eine führende Stellung gemeinsam mit dem NIST. Gestützt ist dieser Anspruch auf die Ergebnisse des Mutual Recognition Arrangement des *Comité International de Poids et Mesures*, des CIPM-MRA. In dessen Rahmen werden die Kalibrier- und Messmöglichkeiten der teilnehmenden Institute validiert und in der CMC-Datenbank des *Bureau International de Poids et Mesures* (BIPM) öffentlich zugänglich gemacht (vgl. A.I.7). |¹⁶ In dieser Datenbank sei die PTB im April 2016 mit mehr als tausend Einträgen vertreten gewesen und damit häufiger als jede andere europäische Einrichtung und etwa so häufig wie das NIST. Die PTB beteiligte sich am häufigsten an internationalen Schlüsselvergleichen und fungiere noch vor den genannten Einrichtungen aus den USA, Großbritannien und Japan am häufigsten als Pilotlabor. |¹⁷ Aktuell nimmt die PTB an rund 150 laufenden Vergleichsmessungen bzw. Pilotstudien teil. Dabei wirkt sie in 30 % der Fälle als Pilotlabor.

|¹⁶ CMC = *Calibration and Measurement Capabilities*. Die 1875 gegründete Internationale Meterkonvention mit dem *Bureau International de Poids et Mesures* (BIPM) als ausführendes Organ ist eine internationale Organisation, die das Ziel verfolgt, ein weltweit einheitliches und eindeutiges System von Maßen auf Basis des Internationalen Einheitensystems (SI) bereit zu stellen.

|¹⁷ Als Pilotlabor wird das einen Schlüsselvergleich organisierende und leitende Institut bezeichnet, dem laut PTB üblicherweise auch die jeweils höchste Kompetenz zugesprochen wird.

Auch im FuE-Bereich vertritt die PTB den Anspruch, in vielen Bereichen auf Augenhöhe mit dem NIST zu sein oder sogar eine führende Position einzunehmen. Dies gelinge durch Netzwerkbildung (z. B. Netzwerk Metrologie in der Chemie), gezielte Kooperation mit Universitäten (z. B. Nanometrologie) oder Konzentration auf Schlüsselkompetenzen (z. B. hochgenaue Rückführung in der Chemie) teilweise auch auf Gebieten, auf denen das NIST wesentlich besser ausgestattet sei. Insgesamt könne die PTB nach eigener Einschätzung aufgrund der Ausstattungsunterschiede jedoch bei weitem nicht die Breite des NIST erreichen.

Die PTB weist darauf hin, dass die oft wesentlich durch sie mit aufgebaute Metrologie früherer Schwellenländer gerade in Asien zuletzt einen starken Aufschwung erfahre und von erheblichen Investitionen profitiere; dies gelte etwa für China, Südkorea oder Thailand. Aus ihrer Sicht sei daher zu erwarten, dass sich die globale Gewichtung der Metrologie in Zukunft deutlich verschieben und die PTB in wenigen Jahren von Einrichtungen asiatischer Staaten überholt werde. Aufgrund der derzeit stagnierenden Grundfinanzierung und der nach eigener Einschätzung zunehmenden Beanspruchung durch ihre Grundaufgaben sei es oft nicht möglich, so die PTB weiter, innovative Felder intensiv und nachhaltig zu bearbeiten.

A.II ARBEITSSCHWERPUNKTE

II.1 Forschung und Entwicklung

Die PTB hat entsprechend Einheiten- und Zeitgesetz (§ 6, Abs. 3) sowie nach Mess- und Eichgesetz (§ 45) einen gesetzlichen Auftrag, metrologische Forschung und Entwicklung zu betreiben. Die PTB schätzt, dass etwa zwei Drittel des Ressourcenaufwands für FuE in die metrologische Grundlagenforschung fließen. Den größten Teil nehmen dabei nach Auskunft der Bundesanstalt mittelfristige Projekte ein, die auf die Erfüllung eines bereits absehbaren zukünftigen Bedarfs zielen. Hierunter fallen insbesondere solche eher entwicklungslastigen Vorhaben, die sich auf die Erweiterung von Skalen oder die Verringerung von Messunsicherheiten bei der Darstellung und Weitergabe der Einheiten beziehen.

Auch im Hinblick auf spezielle gesetzliche Aufgaben oder zukünftig zu erbringende Dienstleistungen betreibt die PTB Vorlaufforschung, die einem Anteil von etwa 10 % der Aufwendungen für FuE in der PTB entspricht und in erheblichem Umfang drittmittelfinanziert sei. Diese Vorlaufforschung erfolge meist in Zusammenarbeit mit universitären und außeruniversitären Forschungseinrichtungen. Auch die neuen selbstständigen wissenschaftlichen Nachwuchsgruppen der PTB werden dieser explorativen FuE zugerechnet.

Die PTB betont, dass Forschung und Entwicklung für ihr Aufgabenspektrum unabdingbar sind. Künftige Bedarfe zeichneten sich voraussichtlich besonders ab in den Gebieten:

- _ Entwicklung von optischen Uhren,
- _ Metrologie auf der Basis von quantenphysikalischen Effekten,
- _ Nanometrologie sowie deren Verknüpfung mit der Quantenmetrologie,
- _ Biochemie und Biomedizin,
- _ Metrologische IT, Metrologie in der *Cloud*,
- _ Metrologie für Industrie 4.0 und *E-Health*.

II.1.a Forschungsplanung

Die PTB nutzt verschiedene Instrumente der Arbeits- und Forschungsplanung, |¹⁸ um mit deren Hilfe Ziele festzulegen und zu priorisieren. Die Planungsprozesse unterliegen dabei unterschiedlichen Zeitzyklen:

- _ einjährig: „Arbeitsplanbesprechungen“ zwischen Präsidium, Abteilungs- und Fachbereichsleitungen.
- _ einjährig: Investitionen über 250 Tsd. Euro werden in einer sogenannten Größtgeräte |¹⁹-Direktorenkonferenz abteilungsübergreifend diskutiert. Diese Beratungen finden im Kontext der Arbeitsplanungen jeweils im Herbst eines Jahres statt. In die Bewertung fließen neben dem Bezug der Maßnahme zum Auftrag der PTB und der Wirtschaftlichkeitsuntersuchung die vorhandenen Kompetenzen und Ressourcen sowie der zu erwartende „Impact“ für Nutzerinnen und Nutzer ein. Wenn erforderlich, werden zusätzlich externe Gutachtereinschätzungen eingeholt. In der eigentlichen Lesung tragen die verantwortlichen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler dem Präsidium und den Abteilungsleitungen vor. Die Letztentscheidung liegt bei der Präsidentin bzw. dem Präsidenten.
- _ dreijährig: Erstellung des „Arbeits- und Forschungsprogramms“ im Forschungsausschuss der PTB, dem das Präsidium, die Leitungen der Fachabteilungen und des Präsidialen Stabes angehören. Jedem Ausschussmitglied ist die Redaktionsverantwortung für einen Teil des Arbeitsprogramms zugeord-

| ¹⁸ Die PTB weist darauf hin, dass die Planungsabläufe in der Bundesanstalt detailliert in einem Leitfadens beschrieben sind und dieser allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern im Intranet zur Verfügung steht.

| ¹⁹ Größtgeräte reichen von aufwendigen Instandhaltungsmaßnahmen bis hin zu Anschubmaßnahmen neuer Aufgabengebiete. Nach Angaben der PTB stellen die Abteilungen ca. 10 bis 15 Anträge pro Jahr, die strategisch begründet werden, beispielsweise mit dem ermittelten Bedarf der Kunden und einer Einordnung in die europäische und internationale Forschungs- bzw. Dienstleistungslandschaft.

net und die Ausschussmitglieder vertreten diese Programmteile beispielsweise auch bei den Verhandlungen im Rahmen des EMRP/EMPIR. |²⁰

– drei- und mehrjährig: Langfristige Entwicklungen in Wissenschaft, Wirtschaft und Gesellschaft und die daraus für die PTB abzuleitenden Strategien werden auf einer „Strategiekonferenz“ diskutiert, zu der sich das Präsidium und die Abteilungsleitungen in Klausur begeben. Strategiekonferenzen werden thematisch nach Bedarf gestaltet; sie umfassen generell alle Aspekte der PTB, von wissenschaftlichen Fachaufgaben über Dienstleistungen bis hin zur inneren Struktur und Personalentwicklung.

II.1.b Forschungs- und Entwicklungsschwerpunkte

Die PTB gliedert ihr Arbeits- und Forschungsprogramm in 14 sogenannte Themenbereiche, die überwiegend abteilungsübergreifend bearbeitet werden (zu den Abteilungen vgl. Anhang 8). Die Einteilung in Themenbereiche dient nach Auskunft der Bundesanstalt dazu, die Schwerpunktsetzung und entsprechende Ressourcenzuteilung fachthemenbezogen durchzuführen und die fachbereichsübergreifende Arbeit zu fördern, ohne dabei die Aufbauorganisation aufzuheben. Die zehn Themenbereiche 1 bis 7 und 9 bis 11 entsprechen inhaltlich den metrologischen Disziplinen, die sich in den zehn fachwissenschaftlichen *technical committees* manifestieren, in denen der europäische Verband nationaler Metrologieinstitute EURAMET die wissenschaftliche und technische Zusammenarbeit koordiniert. Diese technischen Komitees, die in ähnlicher Form auch in den anderen Regionen weltweit existieren, spiegeln wiederum die Struktur der Konsultativkomitees unter der Internationalen Meterkonvention. Die übrigen Themenbereiche tragen laut PTB wichtigen weiteren Arbeitsfeldern Rechnung.

Die Themenbereiche, die den *technical committees* bzw. Konsultativkomitees der Internationalen Meterkonvention entsprechen, bestehen bereits seit Jahrzehnten. Änderungen werden in absehbarer Zukunft nicht erwartet. Durch neue Entwicklungen in der Metrologie können nach Angaben der PTB über Zeitspannen von wenigen Jahren neue Themenbereiche hinzukommen. Auswirkungen auf die Abteilungsstruktur habe dies primär nicht. Auch jetzt schon würden Themenbereiche abteilungsübergreifend bearbeitet.

Kernaufgabe der Metrologie und der entsprechenden Themenbereiche ist die theoretische Definition von Einheiten für Messungen physikalischer Größen, die fundamentale Realisierung dieser Einheiten in der Praxis (Darstellung)

|²⁰ Bei EMRP bzw. EMPIR handelt es sich um zwei aufeinanderfolgende europäische Metrologieforschungsprogramme. Vgl. A.I.1.

durch Referenzaufbauten oder -objekte (Primärnormale |²¹) und die Weitergabe der Einheiten durch Vergleich von Messungen mit den Primärnormalen (Kalibrierung), um Messergebnisse auch international in geschlossenen Ketten – ggf. über TransfERNormale – auf Primärnormale beziehen zu können (Rückführung).

Für Frühjahr 2018 wird eine Resolution der internationalen *Conférence Générale des Poids et Mesures* (CGPM) erwartet, um das Internationale Einheitensystem (SI-System) für physikalische Größen derart umzudefinieren, dass auch die SI-Basiseinheiten für Masse (Kilogramm), Stromstärke (Ampere), Temperatur (Kelvin) und Stoffmenge (Mol) sowie bereits die SI-Basiseinheiten für Zeit (Sekunde) und Länge (Meter) auf Naturkonstanten zurückgeführt werden, deren numerische Werte exakt fixiert werden. In den entsprechenden Themenbereichen erforscht und entwickelt die PTB daher wissenschaftliche und technische Methoden zur möglichst genauen Bestimmung dieser Naturkonstanten in den bisher geltenden SI-Einheiten, um die neuen Einheiten nahtlos an die alten Einheiten anknüpfen lassen zu können und mindestens so genau darzustellen und weiterzugeben wie bisher. |²²

Themenbereich 1 „Akustik, Ultraschall, Beschleunigung“

Dieser Themenbereich erforscht und entwickelt Methoden, Messeinrichtungen und Referenzgeräte, um Schall und Bewegung in verschiedenen Forschungs- und Anwendungsgebieten so genau wie möglich messen zu können. Die in der Abteilung 1 „Mechanik und Akustik“ |²³ bearbeiteten metrologischen FuE-Schwerpunkte reichen von therapeutischen Hochleistungsultraschallfeldern und der optischen Bestimmung des Ultraschalldrucks in Flüssigkeiten über die Schalleistung in Luft bis hin zur Geschwindigkeit von Fahrzeugen.

Eine Aufgabe des Themenbereichs besteht darin, Schall- und Ultraschallmessgeräte in Luft und Wasser (Mikrophone, Hydrophone) zu kalibrieren. Zur Erweiterung des Frequenzbereichs wird hierzu ein optisches Messverfahren für den Ultraschalldruck in Wasser entwickelt, das als Primärnormal die Druckeinheit Pascal direkt auf die Basiseinheiten Meter und Sekunde zurückführt. Der Themenbereich widmet sich auch der Erforschung des menschlichen Hörens (Audiologie) sowie der Vermessung des Gehörs (Audiometrie) und entwickelt Verfahren zur Kalibrierung von Ohrsimulatoren. Ferner werden Hoch-

|²¹ Von Primärnormalen, die eine Einheit mit der dem jeweiligen technischen Stand entsprechenden höchsten Genauigkeit realisieren, lassen sich weitere Normale ableiten.

|²² Um die Kontinuität der nach dem bisher geltenden SI erfolgten Messungen zu wahren, müssen die der neuen Definition jeweils zugrunde liegenden Naturkonstanten mindestens so genau bestimmt werden können, wie die bisherigen Einheiten dargestellt werden können. Im Umkehrschluss können die dafür verwendeten Aufbauten als Referenz für die Darstellung der jeweiligen neuen Einheit dienen.

|²³ Beteiligt sind die Fachbereiche 1.3 „Geschwindigkeit“, 1.6 „Schall“ und 1.7 „Akustik und Dynamik“.

leistungsultraschallfelder vermessen, die in der Medizin beispielsweise zur lokalen Bekämpfung von Tumoren eingesetzt werden können.

Darüber hinaus werden Methoden zur Darstellung und Weitergabe der Einheiten für Linear- und Kreisbeschleunigung erarbeitet und verfeinert, die jüngst in die entsprechende ISO-Norm einfließen. Ein weiterer Schwerpunkt liegt in der Darstellung und Weitergabe der Einheit der Schalleistung in Luft anhand eines im Themenbereich entwickelten Primärnormals.

Zudem erfolgt die Entwicklung von Referenzgeräten zur mehrziel- und echtzeitfähigen Messung der Geschwindigkeit von Fahrzeugen (Streckenradar) und die Beratung zum Einsatz von Verkehrsüberwachungsverfahren.

Themenbereich 2 „Durchfluss“

In diesem u. a. für die Gas- und Mineralölwirtschaft relevanten Themenbereich arbeiten die Abteilungen 1 und 7 |²⁴ an der Darstellung, Weitergabe und Rückführung der Einheiten

- _ für Menge, Durchfluss |²⁵ und Geschwindigkeit strömender Gase,
- _ für Menge und Durchfluss strömender Flüssigkeiten sowie
- _ für die Menge von ruhenden Flüssigkeiten und den thermischen Energieinhalt von Flüssigkeiten,

um diese Größen in der Wirtschaft, insbesondere im Energiesektor, so genau und einheitlich wie möglich zu bestimmen.

Für Flüssigkeiten verfügt die PTB über verschiedene Normalmessenrichtungen, wobei Wasser und das Hydrodynamische Prüffeld (HDP) die zentrale Stellung einnehmen. Bisherige Verfahren hängen von den Stoffparametern der zu messenden Flüssigkeit ab, sodass für jede messtechnisch relevante Flüssigkeit eine eigene Rückführbarkeitskette aufzubauen wäre. Die PTB hat das Ziel, mit Hilfe zu entwickelnder medienunabhängiger Transfernormale und -verfahren eine Rückführung aller Flüssigkeitsmessungen auf ein einziges nationales Normal – das HDP – zu ermöglichen. Ferner arbeitet der Themenbereich daran, auch zeitlich veränderliche Durchflüsse möglichst genau zu messen (Darstellung des Momentandurchflusses).

Auch für Gase will die PTB ein geschlossenes System der Rückführbarkeit auf ihre nationalen Normale schaffen. Im Mittelpunkt stehen hier Luft (Windmessungen im Rahmen des Windkraft-Kompetenzzentrums), Hochdruck-Erdgas, Wasserstoff und Wasserstoff-Erdgas-Gemische.

|²⁴ Beteiligt sind die Fachbereiche 1.4 „Gase“, 1.5 „Flüssigkeiten“ und 7.5 „Wärme und Vakuum“.

|²⁵ Der Durchfluss oder Volumenstrom ist das Volumen einer Flüssigkeit oder eines Gases, das pro Zeiteinheit einen bestimmten Querschnitt (typischerweise im Rohr) passiert.

Ferner entwickelt der Themenbereich nichtinvasive laseroptische und ultraschallbasierte Verfahren der Vor-Ort-Durchfluss- und Temperaturmessung zum Einsatz und zur Effizienzsteigerung in konventionellen wie solarthermischen Kraftwerken.

Themenbereich 3 „Elektrizität und Magnetismus“

Dieser mit der Abteilung 2 „Elektrizität“ deckungsgleiche Themenbereich erforscht und entwickelt in fünf Schwerpunkten wissenschaftliche und technische Methoden zur Darstellung, Bewahrung und Weitergabe der elektrischen und magnetischen Einheiten. Ziel ist, elektrische und magnetische Einheiten auf exakte Quanteneffekte auf atomarer Skala zurückzuführen und elektromagnetische Größen in Energieversorgung (Energiesmesstechnik) sowie in Funk und drahtloser Kommunikation (Hochfrequenztechnik) so genau wie möglich zu messen.

Im Schwerpunktthema „Grundlagen der elektrischen Metrologie“ erforscht und entwickelt die PTB eine sogenannte selbstreferenzierte Quantenstromquelle, um die SI-Basiseinheit der Stromstärke (Ampere) auf die konstante Elementarladung einzelner Elektronen zurückzuführen. Diese integrierte Schaltung besteht aus in Serie geschalteten Halbleiter-Einzelelektronen-Stromquellen und metallischen Einzelelektronen-Detektoren. Letztere registrieren Abweichungen vom Sollwert des Einzelelektronenstroms. Mit dem Verfahren sollen quantisierte Ströme mit einer relativen Unsicherheit von etwa 10^{-7} bestimmt werden. Damit wird die Unsicherheit der Amperedarstellung im heutigen SI übertroffen werden.

Der „Aufbau von Quanten- und klassischen Skalen für elektrische und magnetische Einheiten“ im gleichnamigen Schwerpunktthema erfolgt mit Quantenschaltungen insbesondere für Spannung, Widerstand, Impedanz und Kapazität. Pulsgetriebene Spannungsnormale, die auf dem quantenphysikalischen Josephson-Effekt beruhen (Tunnelstrom zwischen zwei Supraleitern), können reine Sinusspannungen darstellen und damit die Basis einer quantenbasierten, selbstreferenzierten Wechselstrommesstechnik bilden.

Das Schwerpunktthema „Elektrische Energiesmesstechnik“ entwickelt die messtechnischen Dienstleistungen, die für die elektrische Energieversorgung erforderlich sind. Hierzu zählen die Hochspannungsmesstechnik, Abrechnungsmesstechnik |²⁶ und intelligente Messsysteme (*smart meter*).

Arbeiten im Schwerpunktthema „Hochfrequenz- und Terahertz-Metrologie“ widmen sich funk- und kommunikationstechnisch genutzten hochfrequenten

|²⁶ Im Arbeits- und Forschungsprogramm 2015 bis 2017 wird die Entwicklung von Abrechnungsmesstechnik zur Integration von Photovoltaik-Speicher-Kombinationsanlagen in das Verteilnetz genannt.

elektromagnetischen Feldern, den entsprechenden Antennen und den Hochfrequenz-Grundgrößen. Die Forschung zielt unter anderem auf die Terahertz-Lücke im elektromagnetischen Spektrum zwischen Mikrowellen- und Infrarotbereich ab, die durch medizinische, sicherheitstechnische, wirtschaftliche und kommunikationstechnische Anwendungen zunehmend erschlossen wird (Detektion von Hautkrebs, Körperscanner an Flughäfen, Qualitätskontrolle von Industrieprodukten, Funknetze im Haushalt und zwischen Satelliten). Ferner werden fliegende Messplattformen (Octocopter-Drohnen) zu Messungen der Feldstärke im Raum um große Antennen, der Beeinflussung von Radarsystemen durch Windkraftanlagen und der Emission komplexer, ortsfester Anlagen entwickelt.

Im Schwerpunktthema „Metrologie für magnetische Nanostrukturen“ werden Messverfahren für beispielsweise in der Medizin eingesetzte magnetische Nanopartikel und -strukturen entwickelt, und magnetisch beeinflusste, durch räumliche Temperaturgradienten hervorgerufene elektrische Spannungen in Nanodrähten untersucht und zur Anwendung entwickelt (Patent eines nanoskaligen Temperatursensors).

Themenbereich 4 „Ionisierende Strahlung“

Dieser mit der gleichnamigen Abteilung 6 deckungsgleiche Themenbereich umfasst die Darstellung, Bewahrung und Weitergabe der relevanten SI-Einheiten, Prüfungen, Zulassungen und Qualitätssicherung aufgrund einer umfangreichen gesetzlichen Beauftragung |²⁷ sowie die Untersuchung von Fragen zur biologischen Wirkung ionisierender Strahlung in Umwelt und Medizin. Es handelt sich um Bereiche, die neben besonders genauen Messungen auch unmittelbar besonders hohes gesellschaftliches und individuelles Vertrauen in die korrekte Messung und Interpretation der Messergebnisse erfordern. So ist die PTB beispielsweise auch an dem vom Bundesamt für Strahlenschutz betriebenen Integrierten Mess- und Informationssystem (IMIS) zur Überwachung der Umweltradioaktivität beteiligt und stellte nach der Reaktor-katastrophe von Fukushima aktualisierte Messergebnisse zur Information der Öffentlichkeit online zur Verfügung. FuE des Themenbereichs sind die Verbesserung der Messmöglichkeiten, die auf die metrologische Unterstützung medizinischer Anwendungen, die Wirkmechanismen ionisierender Strahlung in bi-

|²⁷ Neben Mess- und Eichgesetz (MessEG) und Mess- und Eichverordnung (MessEV) betrifft dies die Strahlenschutzverordnung (StrSchV), das Strahlenschutzvorsorgegesetz (StrVG), die Röntgenverordnung (RöV), die Richtlinie zur Emissions- und Immissionsüberwachung kerntechnischer Anlagen (REI), das Medizinproduktegesetz (MPG) und die Medizinproduktebetriebsverordnung (MPBetreibV). Die mit dem Strahlenschutz zusammenhängenden Rechtsvorschriften werden derzeit in einem in Vorbereitung befindlichen Strahlenschutzgesetz (StrSchG) zusammengeführt.

ologischen Geweben, den Strahlenschutz für Personal und Patientinnen bzw. Patienten sowie die Überwachung der Umwelt fokussiert.

Die PTB stimmt sich mit dem Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) gemäß der jeweiligen gesetzlichen Beauftragung ab. Die unter der Federführung des Bundesministeriums für Umweltschutz, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) stehenden Gesetze und Verordnungen werden in ein neues Strahlenschutzgesetz übergehen, das 2018 in Kraft treten und die jeweiligen Zuständigkeiten weiter schärfen soll. PTB und BfS kooperieren auch in gemeinsamen Forschungsprojekten, beispielsweise im Rahmen von EMRP und EMPIR.

Insbesondere im nuklearmedizinischen Bereich und bei den bildgebenden Verfahren wie der Röntgen-Computertomografie (CT) mangelt es laut PTB bisher an Basisdaten, Messgrößen und Messverfahren für die Aktivität und die Strahlendosis, obwohl ein Großteil der zivilisatorisch bedingten Strahlenbelastung aus CT-Aufnahmen resultiert. |²⁸

Hierzu übernimmt der Themenbereich die Darstellung und Weitergabe strahlungsrelevanter SI-Einheiten, unter anderem der Aktivität (Zerfallsrate) in der Nuklearmedizin verwendeter radioaktiver Stoffe und der Wasser-Energiedosis. |²⁹ Er entwickelt Verfahren zur Bestimmung der Dosis in Röntgendiagnostik, Strahlentherapie und Strahlenschutz und zur Quantifizierung der CT-Bildqualität. Ferner werden Modelle und Simulationen erarbeitet, um die biologische Strahlungswirkung messtechnisch auf die physikalische Struktur von Teilchenspuren zurückzuführen. Diese Teilchenspursstruktur umfasst über das primäre Teilchen hinaus auch alle erzeugten Sekundärteilchen und deren Strahlungswirkung und ist somit insbesondere für in der Strahlentherapie eingesetzte Ionenstrahlung relevant, deren Wirkung makroskopisch bisher nur durch das Primärteilchen erfasst worden ist.

Zur Analyse der Zusammensetzung und Aktivität von Umweltproben, die sehr langsam zerfallende oder nur mit sehr langen Messzeiten analysierbare radioaktive Stoffe enthalten, entwickelt der Themenbereich massenspektroskopische Methoden, bei denen die Zusammensetzung der Probe anhand der verschiedenen Atom- bzw. Molekülmassen bestimmt und die Aktivität auf entsprechende Referenzproben zurückgeführt wird.

Der Bereich der Neutronenmetrologie umfasst neben der Dosimetrie Beiträge zur Grundlagenforschung, z. B. am CERN, und zur Kernfusion. So ist die Rück-

|²⁸ Eine CT-Aufnahme des Bauches (Abdomens) setzt Patientinnen und Patienten typischerweise einer Strahlenbelastung aus, die etwa drei Jahren natürlicher Strahlenbelastung entspricht.

|²⁹ Die Wasser-Energiedosis ist die grundlegende Messgröße für die Strahlentherapie und gibt an, wie viel Energie pro Masse das Wasser über den gesamten Bestrahlungszeitraum aufnimmt. Über die Temperaturerhöhung des Wassers lässt sich diese Messgröße direkt und vergleichsweise genau für diverse strahlentherapeutisch relevante Bestrahlungsarten und Bestrahlungsbedingungen darstellen.

führung der Messung des Neutronenflusses an der Fusionsanlage Wendelstein-7X Voraussetzung für deren Betrieb.

Darüber hinaus bestimmt der Themenbereich für die Metrologie relevante Basisdaten von Atomen und Kernen. Ein weiterer Schwerpunkt ist schließlich die Entwicklung von tragbaren und ortsfesten Strahlungsmessgeräten (Personen- und Ortsdosimetern) für alle Arten ionisierender Strahlung.

Themenbereich 5 „Länge, dimensionelle Metrologie“

Dieser Themenbereich übernimmt die Darstellung, Bewahrung und Weitergabe der SI-Einheit Länge; erforscht und entwickelt werden wissenschaftliche und technische Methoden, um die räumliche Ausdehnung (Dimension) von Objekten und verwandte Eigenschaften sowie die räumliche Entfernung zu einem Objekt zu messen. Er setzt sich aus Fachbereichen der Abteilungen 4, 5 und 7 |³⁰ zusammen.

Für die Realisierung und Weitergabe der Längeneinheit entwickelt der Themenbereich Lasernormale im optischen und nahen infraroten Bereich mit hinreichend scharfer Wellenlänge, die sich aus Präzisionsmessungen der optischen Frequenz ergibt. |³¹ Präzisionslängenmessungen im Bereich von Nanometern bis zu einigen Metern vergleichen die zu messende Länge mit bekannten Lichtwellenlängen (Interferometrie). Entwicklungen betreffen beispielsweise die Vermessung prismatischer Körper zur Untersuchung des thermischen Ausdehnungsverhaltens und der Langzeitstabilität von Materialien, die genaue Bestimmung des Kugelvolumens für das Avogadro-Projekt (siehe unten) und die Messung von Entfernungen bis 1 km in der Geodäsie auf der Basis von Lasern, die Licht in Pulsen im Femtosekundenbereich aussenden (Femtosekundenlaser), sowie auf Basis der Mehrwellenlängeninterferometrie. Der Themenbereich entwickelt und optimiert ferner Messverfahren an Längenteilungen im Nanometerbereich (Nanometerkomparator), für Winkelteilungen und zur Bestimmung der Atomabstände in kristallinen Gitterstrukturen, die unter anderem als Normale für mikroskopische Messungen dienen.

Weitere Aufgaben des Themenbereichs sind die Entwicklung von Messverfahren zur Weitergabe dimensioneller Messgrößen an Oberflächen in verschiedenen Skalenbereichen, zum Beispiel die Bestimmung der Rauheit mittels taktiler, optischer oder rasterkraftmikroskopischer Sensoren, ferner von Messgrößen

|³⁰ Beteiligt sind die Fachbereiche 4.2 „Bild- und Wellenoptik“, 4.3 „Längeneinheit und Quantenoptik“, 5.1 „Oberflächenmesstechnik“, 5.2 „Dimensionelle Nanometrologie“, 5.3 „Koordinatenmesstechnik“, 5.4 „Interferometrie an Maßverkörperungen“ und 7.1 „Radiometrie mit Synchrotronstrahlung“.

|³¹ Das Meter ist durch die Strecke definiert, die Licht im Vakuum innerhalb des Zeitintervalls von 1/299 792 458 Sekunden durchläuft. Die Längeneinheit ist somit über die Lichtgeschwindigkeit mit der Zeiteinheit verknüpft.

ßen an Oberflächenschichten, an Objekten, Komponenten und Systemen mit Abmessungen unterhalb von einem Millimeter und oftmals hohen Aspektverhältnissen sowie an makroskopischen Messobjekten mit Abmessungen von Zentimetern bis zu einigen zehn Metern. Der Themenbereich entwickelt Verfahren zur rückführbaren Charakterisierung von Materialeigenschaften, zum Beispiel der Härte oder der thermischen Ausdehnung.

Themenbereich 6 „Masse und abgeleitete Größen“

In diesem Themenbereich arbeiten Fachbereiche der Abteilungen 1, 3, 4 und 7 |³² daran, die mechanischen Einheiten für Masse, Kraft, Drehmoment und Druck darzustellen und weiterzugeben. FuE-Schwerpunkte betreffen die Avogadro-Konstante |³³ zur Neudefinition des Kilogramms und bei Windkraftanlagen auftretende große Drehmomente.

Für die Neudefinition des Kilogramms verfolgt die PTB den Weg über das „Zählen“ von Atomen in einer Siliziumkristallkugel. Dabei wird durch Messung der Kristalleigenschaften (u. a. der molaren Masse und der Abstände benachbarter Atome) sowie der Kugeleigenschaften (u. a. der Masse und des Volumens) die Avogadro-Konstante bestimmt, über die das Kilogramm auf die exakte atomare Masse zurückgeführt werden kann. |³⁴ Das internationale Avogadro-Projekt erzielt dabei Ergebnisse, die mit denen des international vom NIST angeführten, alternativen „Wattwaagen“-Projekts konsistent sind und ebenfalls eine relative Unsicherheit im Bereich 10^{-8} erreichen.

Im konstruktiven Ingenieurbau und bei erneuerbaren Energien, vor allem der Windenergie, sind Kräfte zu messen, die der Gewichtskraft von etwa 5000 Tonnen entsprechen. Der Themenbereich entwickelt hierfür und im Rahmen des Windkraftkompetenzzentrums auch für die bei Windkraftanlagen auftretenden Drehmomente jeweils Normalmesseinrichtungen. Ebenso werden die Messbereiche für kleine und für dynamische Kräfte und Drehmomente erweitert.

Zur Bestimmung der Boltzmann-Konstante (siehe Themenbereich 10) entwickelt der Themenbereich Druck-Primärnormale mit Unsicherheiten von klei-

|³² Beteiligte Fachbereiche sind: 1.1 „Masse – Weitergabe der Einheit“, 1.2 „Festkörpermechanik“, 1.8 „Masse – Darstellung der Einheit“, 3.1 „Metrologie in der Chemie“, 4.3 „Quantenoptik und Längeneinheit“ und 7.5 „Wärme und Vakuum“.

|³³ Die Avogadro-Konstante N_A setzt die Anzahl Teilchen (Stoffmenge in der Einheit Mol) in Beziehung zur Masse – definiert im geltenden Internationalen Einheitensystem mithin (exakte) atomare Massen über den Internationalen Prototyp für das Kilogramm (IPK, Urkilogramm). Sie ist im Gegensatz zu den anderen als Referenz dienenden Konstanten keine Naturkonstante, sondern eine dem menschlichen Bezugssystem angepasste, mithin willkürliche Definition einer makroskopischen Stoffmenge (beispielsweise wiegt 1 Mol Wasser ca. 18 Gramm).

|³⁴ Ein Kilogramm könnte nunmehr als die Masse einer festgelegten Anzahl von Atomen einer bestimmten Sorte (z. B. Silizium-28) definiert werden.

ner 10^{-6} . Er entwickelt Messmöglichkeiten für dynamische Drücke im Grobvakuum und für Partialdrücke im Hochvakuum.

Themenbereich 7 „Metrologie in der Chemie und Stoffeigenschaften“

Dieser Themenbereich umfasst die metrologische Rückführung von chemisch-analytischen Messungen, die rückführbare Bestimmung von Gaseigenschaften und -zustandsverhalten sowie von Stoffeigenschaften. Anwendungsschwerpunkte liegen in den Sektoren Umweltschutz, Gesundheit und Energie. Die Aufgaben dieses Themenbereich werden in der PTB von Abteilung 3 bearbeitet, wobei eine Aufgabenteilung mit anderen Behörden (insbesondere der BAM) über das von der PTB geleitete Netzwerk Metrologie in der Chemie erfolgt. |³⁵

Zunächst entwickelt der Themenbereich primäre Messverfahren zur Rückführung chemisch-analytischer Messungen in der anorganischen und bioorganischen Analytik sowie der Elektrochemie. Hierzu gehören zum Beispiel biochemische Messgrößen wie Proteine und andere Biomarker in Körperflüssigkeiten, die in Abstimmung mit der Bundesärztekammer und in Kooperation mit medizinischen Partnern erforscht und entwickelt werden sowie die gemeinsam mit der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) bewahrte und ausgebaute Primärbasis für die Elementanalytik aus Reinststoffen mit auf 0,01 % bestimmter Reinheit, Isotopenverhältnismessungen für das Avogadro-Projekt, Entwicklung von Messverfahren und Primärnormalen für pH-Wert und Leitfähigkeit.

Für die Bestimmung der chemischen Zusammensetzung von Gasen (Gasanalyse) sowie suspendierter Partikel (Aerosole), für die Bestimmung physikalisch-chemischer Eigenschaften von Gasen (u. a. Energiegasen) wie Gasfeuchte, Brennwert und Zustandsverhalten werden rückführbare Messverfahren entwickelt. Hierzu gehören zum Beispiel das nationale Normal für die Atemalkoholmessung, die Entwicklung von Primärstandards für die Dichte von Rußaerosolen aus Verbrennungsprozessen (Motorabgase) und die Brennwertrekonstruktion in Gasverteilnetzen.

Der Themenbereich entwickelt Messverfahren für chemisch-physikalische Stoffeigenschaften von Festkörpern und Flüssigkeiten wie Dichte (z. B. der Siliziumkugeln im Avogadro-Projekt) und Energiegehalt (Brennwert- und Heizwertbestimmung von Biodiesel).

|³⁵ Im Einzelnen handelt es sich um die Fachbereiche 3.1 „Metrologie in der Chemie“, 3.2 „Gasanalytik und Zustandsverhalten“ und 3.3 „Thermophysikalische Größen“.

In diesem Themenbereich werden von der Abteilung 8 |³⁶ in der Regel in Kooperation mit medizinischen Partnern biomedizinische Messverfahren erforscht und entwickelt. Die FuE-Arbeiten konzentrieren sich auf die Magnetresonanzbildgebung und -spektroskopie, die Patientensicherheit im MRT, magnetische Nanopartikel für medizinische Diagnostik und Therapie und die Zählung und Konzentrationsbestimmung von Zellen im Blut und anderen Körperflüssigkeiten (durchflusszytometrische Verfahren).

Der Schwerpunkt der Entwicklung neuer medizinischer Messverfahren in der Magnetresonanz-Bildgebung (MR) bei hohen magnetischen Feldstärken, die mitunter mehr als das 100.000-fache des Erdmagnetfelds betragen, liegt auf der Patientensicherheit im MRT. Dabei ist entscheidend, dass sich die hochfrequenten elektromagnetischen Felder im menschlichen Körper gleichmäßig verteilen und nicht lokal erhöhen. Zur Messung und Steuerung dieser Verteilung entwickelt der Themenbereich geeignete Prüfkörper („Phantome“) und Sendeverfahren. Ziel ist auch, die spezifische Gefährdung für Patienten mit metallischen Implantaten zu erforschen. Der Themenbereich entwickelt zudem quantitative MR-Verfahren, die physikalische und physiologische Messgrößen auf eine einheitliche Skala zurückführen und so eine vergleichbare Diagnose und Therapiekontrolle gewährleisten.

Magnetische Nanopartikel können Biomoleküle und Zellen markieren und deren Wege mittels Bildgebungsverfahren sichtbar machen; sie können auch als Transportvehikel zur Extraktion von Biomaterialien aus biologischen Medien dienen oder über externe Magnetfelder in bestimmten Körperregionen wie zum Beispiel Tumoren angereichert werden und dort gezielt pharmazeutische Wirkstoffe freisetzen. Der Themenbereich koordiniert im EU-Projekt „Nano-Mag“ die Analyse und die Standardisierung dieser Partikel. Zusammen mit der Charité erforscht er entsprechende Bildgebungs- und Therapieverfahren.

Der Themenbereich entwickelt darüber hinaus magnetische Mess- und Bildgebungsverfahren im Niedrigfeldbereich zur nichtinvasiven Erfassung der durch Muskel- und Nervenaktivität erzeugten magnetischen Felder, und er erforscht im Rahmen des EU-Projektes „BREAKBEN“ die Darstellung neuronaler Ströme (*Neuronal Current Imaging*) und die Messung der Verteilung aufgeprägter Ströme im Kopf (*Current Density Imaging*).

Daneben entwickelt der Themenbereich optisch-spektroskopische Mess- und Bildgebungsverfahren für die nichtinvasive Messung wichtiger Biomarker (z. B. Hämoglobinkonzentration, Sauerstoffsättigung) sowie zur In-vivo-Darstellung

|³⁶ Tätig sind hier die Fachbereiche 8.1 „Medizinische Messtechnik“, 8.2 „Biosignale“ und 8.3 „Biomedizinische Optik“.

krankheitsbedingter molekularer Veränderungen mit Hilfe fluoreszenzmarkierter Sonden.

Themenbereich 9 „Photometrie und Radiometrie“

Aufgabe dieses Themenbereichs ist die Darstellung und Weitergabe von Einheiten für Messgrößen elektromagnetischer Strahlungsfelder (Radiometrie) und für Messgrößen von Licht |³⁷ bezogen auf die Wahrnehmung durch das menschliche Auge (Photometrie). Im Themenbereich wirken Fachbereiche der Abteilungen 4 und 7 zusammen. |³⁸

Der Themenbereich erforscht und entwickelt Verfahren zur empfänger- und strahlergestützten Photometrie, Spektroradiometrie (wellenlängenabhängige Messung von Strahlungsgrößen) und Laserradiometrie (Vermessung der von Lasern erzeugten Strahlungsfelder) sowie empfänger- und strahlergestützten Radiometrie. Weiterhin erforscht, entwickelt und charakterisiert er Einzelphotonenquellen, die unter anderem zur Realisierung der Quantenkryptographie benötigt werden. Er entwickelt Messverfahren für schmalbandige Licht- und Strahlungsquellen und für die Photovoltaik sowie bildgebende (kamerabasierte) Licht- und Strahlungsmesstechnik. Ein Ziel des Themenbereichs ist, die photometrische SI-Basiseinheit der Lichtstärke (Candela) direkt mit Empfängern zu realisieren, die dasselbe Hellempfindlichkeitsspektrum wie das menschliche Auge aufweisen. |³⁹ Weitere Themen sind klassische und organische Leuchtdioden (LEDs und OLEDs), hohe UV-Bestrahlungsstärken und Strahlungsmessung im Terahertzbereich für Sicherheitstechnik und Erdfernerkundung. |⁴⁰

Gerade in den Spektralbereichen der Vakuum-Ultraviolett- (VUV), Extrem-Ultraviolett- (EUV) und Röntgenstrahlung, für die keine Laser existieren, bietet die Synchrotronstrahlung aus den Speicherringen *Metrology Light Source* (MLS) und BESSY II sehr gute Voraussetzungen für die Radiometrie. Hier charakterisiert der Themenbereich Präzisionsoptiken, insbesondere auch von im Weltraum eingesetzten Instrumenten, die in diesem Spektralbereich stellare Strahlung untersuchen, die von der Erdatmosphäre absorbiert wird, und er

|³⁷ Licht bzw. „optisch“ ist elektromagnetische Strahlung mit Wellenlängen zwischen 380 und 780 Nanometern (violett bzw. rot).

|³⁸ Dabei handelt es sich um die Fachbereiche 4.1 „Photometrie und angewandte Radiometrie“, 7.1 „Radiometrie mit Synchrotronstrahlung“, 7.2 „Kryophysik und Spektrometrie“ und 7.3 „Detektorradiometrie und Strahlungsthermometrie“.

|³⁹ Die sogenannte V-Lambda-Kurve $V(\lambda)$ beschreibt die Hellempfindlichkeit des menschlichen Auges in Abhängigkeit von der Wellenlänge λ des monochromatischen Lichts. Diese Kurve verbindet so im optischen Bereich die physikalischen Strahlungsmessgrößen der Radiometrie mit den über die menschliche Wahrnehmung definierten Lichtmessgrößen der Photometrie.

|⁴⁰ Erdfernerkundung (engl. *remote sensing*) ist die berührungsfreie Messung und Interpretation der von Erdoberfläche oder -atmosphäre ausgehenden bzw. reflektierten Strahlung, z. B. via Flugzeug oder Satellit.

untersucht optische Materialien und Oberflächensysteme, insbesondere für die EUV-Lithografie, sowie Materialien und Oberflächen im Nanobereich (Bestimmung von Nanopartikelgrößen).

Weiterhin übernimmt der Themenbereich die Messung der Reflexions- und Transmissionseigenschaften von optischen Komponenten in verschiedensten Geometrien und Messungen der wellenlängenabhängigen Absorption (Spektrophotometrie) von Halbleiternanopartikeln und funktionalen Oberflächen.

Themenbereich 10 „Thermometrie“

Forschungs- und Entwicklungsschwerpunkte der in diesem Themenbereich zusammenarbeitenden Fachbereiche der Abteilung 7 |⁴¹ sind die Verbesserung der Übereinstimmung der international verwendeten Temperaturskalen und -messverfahren mit der physikalischen (absoluten) Temperatur und die Neudefinition der SI-Einheit für die Temperatur (Kelvin |⁴²) durch Rückführung auf die Boltzmannkonstante. |⁴³

Der Themenbereich erforscht und entwickelt Messverfahren zur Interpolation und Bestimmung bereits definierter und geeigneter neuer Fixpunkte für eine Neudefinition der Internationalen Temperaturskala ITS-90. |⁴⁴ Er entwickelt Thermometer für den Geltungsbereich der *Provisional Low Temperature Scale* (PLTS-2000) im Millikelvinbereich.

Im Rahmen der Neudefinition des Kelvins hat der Themenbereich das Ziel, die Boltzmannkonstante mit einer relativen Unsicherheit von etwa 10^{-6} zu messen. Während hierzu viele Forschergruppen die akustische Gasthermometrie (Schallmessungen) einsetzen, nutzt die PTB ein alternatives Verfahren, das misst, wie weit das Gas Helium das elektrische Feld modifiziert (Dielektrizitätskonstanten-Gasthermometrie). Zur Darstellung des neuen Kelvins entwi-

|⁴¹ Im Einzelnen sind dies die Fachbereiche 7.2 „Kryophysik und Spektrometrie“, 7.3 „Detektorradiometrie und Strahlungsthermometrie“, 7.4 „Temperatur“ und 7.5 „Wärme und Vakuum“.

|⁴² Eine Temperaturdifferenz von einem Kelvin entspricht der Differenz von einem Grad auf der Celsiuskala – der absolute Nullpunkt (0 Kelvin) entspricht $-273,15^{\circ}\text{C}$.

|⁴³ Die Boltzmannkonstante k_B setzt die kinetische Energie einzelner Teilchen in Beziehung zur Temperatur. Eine Neudefinition der Temperatureinheit Kelvin über die Fixierung der Boltzmannkonstante führt die Temperatur von (makroskopischer) Materie also direkt auf die (mikroskopische) thermische Bewegung der Teilchen zurück und macht sie somit unabhängig von einer bestimmten makroskopischen Stoffeigenschaft. Bisher ist das Kelvin über den Tripelpunkt des Wassers definiert, der die Temperatur definiert, an der Wasser als Eis, Flüssigkeit und Dampf koexistieren kann.

|⁴⁴ Die direkte Messung der Temperatur über die thermodynamische Zustandsgleichung eines Stoffes, die eine Beziehung zwischen der Temperatur und den anderen Zustandsgrößen wie Druck und Volumen herstellt, war noch bis vor kurzem mit so großer Unsicherheit behaftet und auch aufgrund der stoffspezifischen Definition des Kelvin über den Tripelpunkt des Wassers mit Schwierigkeiten behaftet, dass die Temperaturmessung über eine ganze Reihe an festgelegten, durch Stoffeigenschaften definierten Fixpunkten und Interpolation zwischen diesen Fixpunkten erfolgt. Diese Fixpunkte und die Verfahren zur Interpolation sind Gegenstand der zurzeit geltenden Internationalen Temperaturskala von 1990 (*ITS-90*) sowie der *Provisional Low Temperature Scale of 2000 (PLTS-2000)* für den Millikelvinbereich.

ckelt der Themenbereich Primärthermometer, die über die durch thermische Bewegung der Ladungsträger allein erzeugte kleine elektrische Spannung an einem Widerstand die absolute Temperatur darstellen (Rauschthermometer).

Weiterhin entwickelt der Themenbereich Verfahren zur Messung thermischer Energie zur Effizienzsteigerung von konventionellen und solarthermischen Kraftwerken. Er übernimmt 80 % der Konformitätsbewertungen von Wärme- und Kältezählern in Europa (weltweit 40 %).

Themenbereich 11 „Zeit und Frequenz“

Dieser Themenbereich erforscht, entwickelt und betreibt Uhren und Methoden, um Zeitdauern und Frequenzen so genau wie möglich zu messen und Zeit- und Frequenzmessungen an verschiedenen Orten so genau wie möglich miteinander vergleichen zu können. Gegenwärtige Schwerpunkte der FuE sind optische Atomuhren und Methoden zur Frequenzübertragung im Mikrowellenbereich via Satellit und im optischen Bereich via Glasfaser. Die verschiedenen Aufgaben im Themenbereich werden in der Abteilung 4 und im QUEST-Institut an der PTB bearbeitet. |⁴⁵

Der Themenbereich betreibt und optimiert Atomuhren, |⁴⁶ die über den im Mikrowellenbereich liegenden Übergang von Cäsium die SI-Zeiteinheit mit Unsicherheiten in der Größenordnung 10^{-16} darstellen, die gesetzliche Zeitskala in Deutschland definieren und zur Koordinierten Weltzeit (UTC) beitragen. Zur Entwicklung noch weitaus genauerer optischer Atomuhren, auf deren Basis die SI-Zeiteinheit neu definiert werden wird, verfolgt die PTB verschiedene Ansätze, unter anderem mit der Ytterbiumionuhr und der Strontiumatomgitteruhr.

Für die interkontinentale Zeit- und Frequenzübertragung entwickelt und optimiert der Themenbereich satellitengestützte Verfahren im Mikrowellenbereich sowohl für Mikrowellen- als auch für optische Uhren. Hierzu zählen internationale Satellitenzeitvergleiche, für die 2017 im ESA-Projekt *Atomic Clock Ensemble in Space* (ACES) Cäsiumuhren an Bord der ISS und an Bodenstationen (u. a. an der PTB) miteinander verglichen werden. Im Jahr 2015 hat die PTB eine optische Verbindung zweier optischer Atomuhren mit einer zehnfach höheren Genauigkeit als im Mikrowellenbereich mit einer mehr als 1.000 km langen Glasfaserstrecke zwischen Braunschweig und Paris weltweit erstmals realisiert. Der Themenbereich arbeitet an dem Aufbau ganzer optischer Netzwerke, die optische Atomuhren im kontinentalen Maßstab verbinden, und die eine Operationalisierung einer genauer definierten SI-Zeiteinheit ermöglichen.

|⁴⁵ Beteiligt sind die Fachbereiche 4.3 „Quantenoptik und Längeneinheit“, 4.4 „Zeit und Frequenz“. Zum Quest-Institut vgl. Anhang 8.

|⁴⁶ Hierzu zählen die primären Fontänenuhren CSF1 und CSF2, die primären Atomstrahluhren CS1 und CS2 und eine Gruppe kommerzieller Cäsiumuhren.

Dieser Themenbereich fasst Fachbereiche der Abteilung 8 |⁴⁷ zusammen, die Querschnittsaufgaben in Mathematik, Statistik, Software und Informationstechnik übernehmen.

Der Themenbereich forscht an metrologisch relevanten mathematischen und statistischen Fragestellungen und unterstützt damit die experimentellen Bereiche der PTB. Schwerpunkte sind die statistische Datenanalyse zur Auswertung von Messungen, die Bestimmung von Messunsicherheiten sowie die Entwicklung mathematischer Modelle und Simulationen physikalischer Prozesse. Der Fachbereich beteiligt sich an Entwicklung und Aufbau eines europäischen Zentrums für Mathematik und Statistik in der Metrologie.

Darüber hinaus entwickelt und prüft der Themenbereich Softwarearchitekturen und IKT-Lösungen zum Einsatz im Messwesen. Neben Fragen der allgemeinen IT-Sicherheit werden Themenfelder der Digitalen Agenda der Bundesregierung bearbeitet, insbesondere Internet der Dinge, *Cloud Computing*, Industrie 4.0, *Smart Services*, intelligente Energienetze und *Big Data*. In Vorbereitung ist eine PTB-Nachwuchsgruppe an der TU Berlin zu sicheren und vertrauenswürdigen netzangebundenen Systemarchitekturen für das Messwesen. Der Fachbereich übernimmt auch die Bauartprüfung und -zulassung von Geldspielgeräten.

Themenbereich 13 „Physikalische Sicherheitstechnik, Explosionsschutz“

In diesem Themenbereich erforschen und entwickeln Fachbereiche der Abteilung 3 |⁴⁸ in Kooperation mit der BAM Maßnahmen zur Bewertung und Vermeidung von Brand- und Explosionsgefahren. Hierzu zählen das Vermeiden explosionsfähiger Atmosphären (primärer Explosionsschutz), das Vermeiden wirksamer Zündquellen (sekundärer Explosionsschutz) und die Beschränkung der Auswirkungen einer Explosion auf ein unbedenkliches Maß (tertiärer Explosionsschutz) sowie der Aufbau der metrologischen Infrastruktur zu Prüfanforderungen durch die Entwicklung von Prüfapparaturen und Prüfverfahren. Forschungsthemen sind u. a. Zündgefahren neuer elektronischer Bauteile wie RFID-Transponder und Hochleistungs-LED, elektrische und elektrostatische Entladungen, mechanisch erzeugte Funken und heiße Oberflächen sowie eigensichere Stromkreise. Die Koordinierung zwischen BAM und PTB erfolgt durch das Lenkungsgremium Physikalisch-Chemische Sicherheitstechnik unter Federführung der BAM.

|⁴⁷ Dabei handelt es sich um die Fachbereiche 8.4 „Mathematische Modellierung und Datenanalyse“ und 8.5 Metrologische Informationstechnik“.

|⁴⁸ Beteiligt sind die Fachbereiche 3.5 „Explosionsschutz in der Energietechnik“, 3.6 „Explosionsschutz Sensorik und Messtechnik“ und 3.7 „Grundlagen des Explosionsschutzes“.

Dieser Themenbereich ergänzt die disziplinären metrologischen Themenbereiche, indem er disziplinenübergreifend die Eigenschaften physikalischer Objekte und Prozesse sowie Messverfahren auf der Nanoskala im Bereich von etwa 1 bis 100 Nanometern zum Gegenstand hat und FuE-Arbeiten aus sechs Abteilungen bündelt. Ein Schwerpunkt ist dabei die Bestimmung der die Funktion kritisch beeinflussenden Abmessungen der Nanoobjekte (dimensionelle Metrologie).

Messtechnisch relevante Prozesse auf der Nanoskala werden unter anderem durch Simulation, Rastersondenmikroskopie (AFM), Entwicklung eines Nanokraftnormals und Realisierung kleiner Massen durch Nanokristallwürfel, Siliziumoberflächen- und -kristallgitternormale für Oberflächen-, Strukturweiten- und Positionsmessungen untersucht. Der Themenbereich entwickelt weiterhin Verfahren zur Bestimmung der Eigenschaften von Nanomaterialien und Nanopartikeln, zum Beispiel die unter anderem für Abgasmessungen relevante Größe und Anzahl von Nanopartikeln in Luft (Aerosol) oder die in der Medizin eingesetzten magnetischen Nanopartikel, allesamt ungeordnete Partikel, als auch zur Bestimmung der Eigenschaften von geordneten Nanostrukturen und ultrapräzisen Oberflächen wie der Oxidschicht auf Siliziumkugeln des Avogadro-Projekts.

Ferner sind dem Themenbereich die Herstellung von Nanostrukturen und Nanomaterialien für metrologische Anwendungen und die Anwendung von Nanotechnologie für die Metrologie zugeordnet.

II.1.c Publikationen, wissenschaftliche Tagungen und Patente

Die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler der PTB haben im Zeitraum 2013 bis 2015 insgesamt 2.118 Publikationen erarbeitet. Darunter waren 62 Monographien, 972 Aufsätze in referierten und 170 in nichtreferierten Zeitschriften, zudem 499 Beiträge zu Sammelwerken im Fremdverlag, 111 Beiträge zu Publikationen im Eigenverlag und 304 eigenständige Internetpublikationen, von denen 147 ein Begutachtungsverfahren durchlaufen hatten (vgl. Anhang 5). Im selben Zeitraum haben die wissenschaftlichen Beschäftigten der Bundesanstalt insgesamt 2.906 Vorträge auf nationalen und internationalen Fachtagungen gehalten, darunter 1.062 referierte Konferenzbeiträge. Diese PTB-Publikationen und Vorträge sind über die online zugängliche Datenbank PTB-Publica recherchierbar. |⁴⁹ Zu den aus Sicht der PTB wichtigsten fünf Publikationen im Begutachtungszeitraum (vgl. Anhang 7).

|⁴⁹ <http://www.ptb.de/cms/presseaktuelles/wissenschaftlich-technische-publikationen/datenbank-ptb-publica.html>.

Die PTB gibt drei Schriftenreihen heraus, die sich an unterschiedliche Zielgruppen richten:

- _ PTB-News (Nachrichtenblatt für wissenschaftlich-technisch Interessierte, deutsch und englisch, erscheint dreimal jährlich als Print-Ausgabe mit ca. 5.000 Abos, als Online-Ausgabe und als Newsletter mit ca. 1.500 Abos),
- _ PTB-Mitteilungen (metrologisches Fachjournal für ein Fachpublikum aus Wissenschaft und Wirtschaft, erscheint viermal jährlich als Print-Ausgabe in ca. 1.200 Exemplaren und Online),
- _ PTB-Berichte (Umfangreiche wissenschaftliche Manuskripte, die sich wegen ihrer sehr speziellen Themen oder wegen ihres Umfangs nicht zur Veröffentlichung in Fachzeitschriften eignen; darunter fallen z. B. auch Dissertationen. Die je nach Bedarf in einer Druckauflage von 200 bis 500 Exemplaren veröffentlichten Publikationen [ca. 10 bis 20 pro Jahr] richten sich an ein wissenschaftlich-technisches Fachpublikum).

Nach eigenen Angaben nutzt die PTB das Internet auch als originäre Veröffentlichungsplattform, etwa in Form von online recherchierbaren Datenbanken zu Originalveröffentlichungen, Patent- und Technologieangeboten, Zertifikaten nach dem Mess- und Eichrecht oder zur Gremienarbeit der PTB.

Im Zeitraum 2013 bis 2015 veranstaltete die PTB eigenständig oder mit Kooperationspartnerinnen und -partnern insgesamt 206 internationale und nationale Konferenzen, Tagungen und Workshops.

Zudem wurden im betrachteten Zeitraum 50 Patente angemeldet, darunter 11 international. Im gleichen Zeitraum wurden 44 nationale und 9 internationale Patente erteilt. Zu Patenten und Know-How-Transfers wurden insgesamt 59 Lizenzverträge abgeschlossen, mehr als 50 % davon als Einmallyzenzen für Software.

II.1.d Drittmittel

Die Gesamtsumme der 2013 bis 2015 vereinnahmten Drittmittel lag bei 96,2 Mio. Euro, davon stammen rund 45 % vom Bund, 38 % von der EU, 6 % von der Wirtschaft, 5 % von der DFG, rund 2 % von den Ländern, 0,3 % von Stiftungen und knapp 4 % von sonstigen Mittelgebern |⁵⁰ (vgl. Anhang 6). Mit 35,3 Mio. Euro (37 %) vereinnahmte die für wissenschaftlich-technische Querschnittsaufgaben zuständige Abteilung Q im Erhebungszeitraum die meisten Drittmittel; diese stammten aus der seit 2006 erfolgenden Beauftragung des Bundesministeriums für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung

|⁵⁰ Zu den sonstigen Mittelgebern gehören insbesondere ausländische Universitäten, Berufsgenossenschaften, Fraunhofer Institute, Max-Planck-Institute, Leibniz-Institute (Wissenschaftseinrichtungen jeweils ohne Projektträger), internationale Institute wie die ESA oder die IAEA, Verbände und Vereine.

(BMZ) mit Projekten im Rahmen der Technischen Zusammenarbeit mit Entwicklungs-, Schwellen- und Transformationsländern (vgl. A.I.5).

Die PTB kann grundsätzlich Drittmittel einwerben, wenn sie am jeweiligen Forschungsprojekt ein Eigeninteresse im Sinne der Erfüllung ihrer gesetzlichen und satzungsgemäßen Aufgaben hat. Die Bundesanstalt verfügt über einen Drittmittelkodex, demzufolge Drittmittel nicht die Neutralität und Unabhängigkeit der PTB gefährden dürfen; dies gilt besonders für Bereiche mit Zulassungs- bzw. Konformitätsbewertungsaufgaben. Aus dem gesetzlichen Auftrag ergeben sich Begrenzungen für die Einwerbung von Drittmitteln.

Die europäischen Forschungsprogramme EMRP/EMPIR |⁵¹ haben das explizite Ziel, Forschung und Entwicklung im Bereich der Metrologie europäisch zu koordinieren. Das von der EU und den 27 EMPIR-Mitgliedsländern jeweils zur Hälfte finanzierte Programm mit einem Volumen von 600 Mio. Euro hat eine Laufzeit von 2014 bis 2024. Das Vorgängerprogramm EMRP (2007-2013) hatte ein Volumen von rund 500 Mio. Euro. In beiden europäischen Metrologie-Programmen leistet Deutschland den größten finanziellen Anteil eines Mitgliedsstaats an der jeweiligen Gesamtfinanzierung der Programme (bei EMRP ca. 30 %, bei EMPIR ca. 25 %). Die PTB war laut Selbstbericht an 95 % der EMRP-Projekte beteiligt und hatte in rund einem Drittel der Vorhaben die Federführung. Im EMPIR-Programm fokussierte sich die PTB nach eigenen Angaben auf die anspruchsvollen Forschungsprojekte, für die drei Viertel des EMPIR Budgets zur Verfügung stünden. Dabei sei die PTB an 84 % der Projekte beteiligt und koordiniere 20 % der Projekte.

Zur Förderung der Drittmittelinwerbung enthalten die den Abteilungen zugewiesenen Mittel einen Anteil, der von der Zahl drittmittelfinanzierter Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter abhängig ist. Zudem werden die Drittmittelprojekte als Leistungskennzahlen in der jährlichen Arbeitsplanbesprechung zwischen Präsidium und Fachabteilungen berücksichtigt.

II.1.e Wissenschaftlicher Nachwuchs und Beteiligung an der Hochschullehre

Von 2013 bis 2015 haben wissenschaftliche Nachwuchskräfte der PTB 64 Promotions- und zwei Habilitationsverfahren abgeschlossen. |⁵² Gegenwärtig sind an der Bundesanstalt etwa 150 Promovierende tätig, die ihre Arbeiten nach Angaben der Einrichtung an rund 30 Universitäten des In- und Auslandes einreichen werden. Postdocs erhalten Arbeitsverträge im Umfang von bis zu

|⁵¹ EMRP - *European Metrology Research Programme*; EMPIR - *European Metrology Programme for Innovation and Research*.

|⁵² Zwei weitere Habilitations- und 16 Promotionsverfahren wurden 2012 abgeschlossen.

100 %, Promovierende im Umfang von 85 % der tariflichen Vergütung (im Bereich der Ingenieurwissenschaften bis zu 100 %).

In den vergangenen Jahren ist die Anzahl der Doktorandinnen und Doktoranden laut PTB stetig gestiegen. Die Bundesanstalt hat daher 2012 ein Doktorandenprogramm etabliert. Im Kern sieht dieses die Unterstützung jeder bzw. jedes Promovierenden durch eine Mentorin bzw. einen Mentor und zwei Promotionsbetreuerinnen bzw. -betreuer an der PTB vor, die im Verlauf des Promotionsvorhabens mindestens zwei Strategiegelgespräche mit der bzw. dem Promovierenden führen.

Gegenstand der Strategiegelgespräche sind Forschungskonzept und Zeitplan der Doktorarbeit bzw. Stand der Forschungsarbeiten, Rückkopplung durch die jeweilige Promotionsbetreuung und Abstimmung des weiteren Vorgehens. Die Doktorandin bzw. der Doktorand dokumentiert das Gespräch in Form eines Kurzprotokolls und schickt dieses den Beteiligten zu. Derzeit beträgt die durchschnittliche Promotionsdauer laut PTB etwas mehr als 4,5 Jahre vom Beginn der Arbeit bis zur Verteidigung. Durch das Förderprogramm soll eine Regelpromotionsdauer von 36 Monaten erreicht werden (ohne Unterbrechungen wie Elternzeiten o. ä.). Der Anteil von Fachhochschul-Absolventinnen bzw. -Absolventen an den Promovierenden beträgt nach Angaben der PTB etwa 13 %.

Die universitätsseitige Betreuung soll frühzeitig festgelegt und in den Prozess eingebunden werden. Darüber hinaus steht den Promovierenden an der PTB eine zentrale Ansprechperson zur Verfügung. Zur Förderung der Promovierenden hat die PTB ein Curriculum erstellt, das Vorträge, Workshops und Kurse umfasst. |⁵³ Die Teilnahme der Promovierenden an nationalen und internationalen Fachveranstaltungen kann finanziell unterstützt werden. Unabhängig davon bieten nahezu alle Fachabteilungen jährliche Doktorandenseminare an. Außerdem besteht an der PTB der „Förder- und Arbeitskreis der Nachwuchswissenschaftler und -ingenieure (FANwing)“, ein informelles Forum für wissenschaftliche Nachwuchskräfte, das den abteilungsübergreifenden Austausch fördert und im Rahmen regelmäßiger Treffen mit Vorträgen und Laborbesichtigungen die unterschiedlichen wissenschaftlichen Arbeitsgebiete der PTB vorstellt.

Gemeinsam mit der TU Braunschweig betreibt die PTB die englischsprachige *International Graduate School of Metrology (B-IGSM)* für Promovierende der Elektrotechnik, Informationstechnik, Physik und Lebenswissenschaften sowie des Ma-

|⁵³ Die Vorträge decken ein Spektrum von der metrologischen Grundlagenforschung über gesetzliche Aufgaben, Technologietransfer und metrologische Dienstleistungen bis hin zur Politikberatung, Karriereentwicklung und Einwerbung von Drittmitteln ab. Workshops und Kurse werden z. B. zu wissenschaftlichem Publizieren, guter wissenschaftlicher Praxis sowie zu *Soft Skills* wie Kommunikation, Präsentationen, Zeit- und Arbeitsorganisation angeboten.

schinenbaus. Die Finanzierung der B-IGSM tragen PTB und TU Braunschweig zu gleichen Teilen. Im September 2016 waren 56 Doktorandinnen und Doktoranden Mitglied der B-IGSM, davon waren 22 an der PTB beschäftigt.

Darüber hinaus ist die PTB beteiligt an drei von der DFG geförderten Graduiertenkollegs:

- _ GRK 1558: Kollektive Nichtgleichgewichtsdynamik in kondensierter Materie und biologischen Systemen (gemeinsam mit der TU Berlin und dem Max-Delbrück-Centrum für Molekulare Medizin, Förderung seit 2009),
- _ GRK 1729: Grundlagen und Anwendungen ultrakalter Materie (gemeinsam mit der Leibniz Universität Hannover, Förderung seit 2012),
- _ GRK 1952: Metrologie komplexer Nanosysteme (gemeinsam mit der TU Braunschweig, Förderung seit 2014).

und einem Integrierten Graduiertenkolleg des Sonderforschungsbereichs 1128 „Relativistische Geodäsie und Gravimetrie mit Quantensensoren – Modellierung, Geo-Metrologie und zukünftige Technologie (geo-Q)“ der Leibniz Universität Hannover in Kooperation mit der PTB und dem Zentrum für angewandte Raumfahrttechnologie und Mikrogravitation (ZARM), Bremen.

Die drei Fakultäten für Maschinenbau, für Elektrotechnik, Informationstechnik, Physik und für Lebenswissenschaften der TU Braunschweig betreiben gemeinsam mit der PTB den interdisziplinären Masterstudiengang „Messtechnik und Analytik“. Zudem beteiligt sich die PTB mit Lehrangeboten und als einer der Praxispartner an dem Dualen Studiengang „Elektro- und Informationstechnik im Praxisverbund“ der Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften, Wolfenbüttel.

Im Jahr 2015 nahmen insgesamt 37 wissenschaftliche Beschäftigte der PTB Lehrtätigkeiten mit durchschnittlich drei Semesterwochenstunden wahr. Sie erbrachten ihre Lehre vor allem an der TU Braunschweig, der Universität Hannover und der TU Berlin. |⁵⁴

Gemeinsam mit Partneruniversitäten vergibt die PTB nach eigenen Angaben in zunehmender Anzahl Studien- und Abschlussarbeiten sowie Praxissemester in ihrem Tätigkeitsfeld. |⁵⁵ Darüber hinaus werden jährlich etwa 120 Praktika an der PTB absolviert, darunter etwa 50 durch Studierende. Im Jahr 2016 bietet die PTB für Studierende von MINT-Fächern erstmalig ein zweimonatiges freiwilliges Forschungspraktikum an, dessen Schwerpunkte von der Grundlagenforschung bis zur technischen Zusammenarbeit reichen. Dieses Instrument

|⁵⁴ Darüber hinaus unterbreiteten sie Lehrangebote an der Ostfalia Hochschule in Wolfenbüttel, den Technischen Universitäten in Darmstadt und Ilmenau, den Universitäten Heidelberg und Stuttgart sowie am Kings College London.

|⁵⁵ 2013: 27 / 2014: 35 / 2015: 45.

habe sich in den vergangenen Jahren bereits beim QUEST-Institut an der PTB bewährt.

II.2 Wissenschaftsbasierte Dienstleistungen, Beratungs- und Informationsleistungen

Die PTB deckt als nationales Metrologieinstitut und technische Oberbehörde ein großes Spektrum an wissenschaftlich-technischen Dienst- und Beratungsleistungen ab. Den Schwerpunkt ihrer Dienstleistungen sieht sie in den gesetzlichen Aufgabenbereichen der Kalibrierung von Messgeräten und der Bauartzulassung bzw. der Konformitätsbewertung von Messgeräten. Hinzu kommen Aktivitäten des Technologietransfers sowie technische Dienstleistungen für die Wirtschaft und andere Kunden.

Der Schwerpunkt der Beratungsleistungen liegt in der Mitarbeit in nationalen und internationalen Normungsgremien, der Beratung der Wirtschaft sowie der Politikberatung.

Gesetzliche Aufgaben

Zu den gesetzlichen Aufgaben zählen Konformitätsbewertungen im Bereich des Mess- und Eichrechts, der europäischen Messgeräte-richtlinie (MID) und der Waagenrichtlinie (NAWID), außerdem gesetzlich vorgeschriebene Prüfungen, Zulassungen und Genehmigungen auf dem Gebiet des Strahlenschutzes und nach dem Medizinproduktegesetz sowie Bauartzulassungen von Geldspielgeräten nach der Spielverordnung.

Im Bereich des Mess- und Eichrechts wird die PTB als gesetzlich beauftragte behördliche Konformitätsbewertungsstelle tätig und ist in der NANDO-Datenbank der Europäischen Kommission Benannte Stelle 0102 für Tätigkeiten nach MID und NAWID. Die PTB ist nach dem Subsidiaritätsprinzip insbesondere dann als Konformitätsbewertungsstelle tätig, wenn es sonst keine Anbieter aus der Wirtschaft gibt oder besondere staatliche Schutzziele durch unabhängige Dritte garantiert werden sollen. Basis der weltweiten Anerkennung im Bereich der Konformitätsbewertung sind neben der von der Kommission bevorzugten Akkreditierung internationale *Peer Review*-Verfahren. |⁵⁶ Ein *Peer-Review*-Verfahren unter Beteiligung der Nationalen Metrologieinstitute Deutschlands, Österreichs und der Schweiz unterstützt die aktuelle Notifizierung der PTB im Rahmen der europäischen Messgeräte-richtlinie (MID) sowie der Waagenrichtlinie (NAWID). Im Bereich Explosionsschutz wird die europäische Benennung aufgrund der Forderung des Gesetzgebers zusätzlich durch eine Akkreditie-

|⁵⁶ Für den Bereich Waagen im Rahmen des „*Mutual Acceptance Arrangement*“ der Organisation *Internationale de Metrologie Legale* (OIML-MAA) und für den Bereich Explosionsschutz im Rahmen des IEC-ExSchemas.

rung |⁵⁷ gestützt. Die PTB führt für über 150 gesetzlich geregelte Messgeräte, Teilgeräte und Zusatzeinrichtungen Konformitätsbewertungen durch; im Erhebungszeitraum waren dies 10.404 Verfahren (ohne Spielgeräte). Bei den Spielgeräten wurden zeitgleich insgesamt 555 Bauarten von Geräten zugelassen. Ferner ist die PTB zuständig für die grundgesetzlich |⁵⁸ basierte und durch das Einheiten- und Zeitgesetz konkretisierte Bewahrung und Weitergabe der Einheiten, insbesondere an Eichbehörden, Prüfstellen, ausländische Metrologieinstitute, akkreditierte Kalibrierlaboratorien des Deutschen Kalibrierdienstes sowie Wirtschaftsunternehmen.

Die PTB arbeitet insgesamt in mehr als 400 Normungsgremien auf nationaler und internationaler Ebene mit, was zahlenmäßig den größten Teil der Harmonisierungsverfahren ausmacht. Zunehmend beteiligt sich die PTB auch an Förderprogrammen des BMWi für normungsbegleitende Forschung und Entwicklung. |⁵⁹ Sie ist außerdem in den Managementgremien des Deutschen Instituts für Normung (DIN) vertreten und berät das DIN beispielsweise in Fragen der angestrebten Internationalisierung. Ferner trägt die PTB laut Selbstbericht zur Unterstützung der in den letzten Jahren entwickelten Normungsstrategie und der *Hightech*-Strategie der Bundesregierung bei.

Als technische Oberbehörde des Bundes ist die PTB in eine Vielzahl von Regelsetzungsverfahren (Gesetze, Verordnungen, Verwaltungsvorschriften) beratend oder strukturierend eingebunden. Zum einen erfolgt eine Beteiligung der PTB (meist über die Fachaufsicht im BMWi) an Ressortabstimmungsverfahren der Bundesregierung; zum anderen gibt es Gesetzgebungsverfahren im Bereich der gesetzlichen Aufgaben der PTB oder mit klarem technischem Bezug, bei denen die PTB bereits im Vorfeld in die Beratungen durch das federführende Ressort eingebunden wird und bis zu deren Abschluss daran mitwirkt. Als prominentes Beispiel für ein wichtiges Gesetzgebungsverfahren im Erhebungszeitraum nennt die PTB das Mess- und Eichgesetz, in Kraft getreten am 1. Januar 2015, einschließlich seiner Verordnungen |⁶⁰ und Kommentierung. Zeitweise seien zu diesem Thema gleichzeitig zwei Wissenschaftler der PTB ins BMWi abgeordnet gewesen. Außerdem seien alle Organisationseinheiten der PTB mit Aufgaben im gesetzlichen Messwesen, insgesamt weit über 100 Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern, daran beteiligt gewesen. Seit Inkrafttreten des neuen Mess- und Eichgesetzes erfolgt ein Großteil der Tätigkeiten im gesetzlichen Messwesen nach Auskunft der PTB nicht mehr als hoheitliche Zulassung, sondern seit

| ⁵⁷ DIN EN ISO/IEC 17 065.

| ⁵⁸ Art. 73 Abs. 1 Nr. 4 GG, § 6 Einheiten- und Zeitgesetz, Abs. 2.

| ⁵⁹ Transfer von Forschungs- und Entwicklungsergebnissen (FuE) durch Normung und Standardisierung (TNS), Innovation mit Normen und Standards (INS), Transfer von metrologischer Technologie (TransMeT), *European Metrology Programme for Innovation and Research* (EMPIR).

| ⁶⁰ MessEV und MessEGebV.

2015 als privatrechtliche Dienstleistung der behördlichen Konformitätsbewertungsstelle bei der PTB.

Politikberatung

Die PTB weist darauf hin, dass der Stellenwert der Politikberatung nicht zuletzt durch das neue Mess- und Eichgesetz zugenommen hat. Dabei entfalle ein erheblicher Anteil auf die Beratung der Europäischen Kommission, z. B. im Zusammenhang mit der „*Measurement Instruments Directive*“ (MID), sowie auf die Beratung anderer Bundesministerien.

Pro Jahr erhalte sie mehrere hundert Anfragen aus den Ressorts:

- _ Bundesministerium für Arbeit und Soziales (BMAS),
- _ Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL),
- _ Bundesministerium für Gesundheit (BMG),
- _ Bundesministerium des Inneren (BMI),
- _ Bundesministerium für Umweltschutz, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB),
- _ Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI),
- _ Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi),
- _ Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (BMZ).

Die weitaus meisten davon kommen laut Selbstbericht aus dem BMWi, darin enthalten sind die über das Bundeswirtschaftsministerium weitergeleiteten Anfragen aus der Bundesregierung und dem Parlament. Von den knapp 600 ministerialen Anfragen an den Präsidialen Stab im Jahr 2015 waren nach Schätzung der PTB etwa 10 % kurzfristig (innerhalb von ein oder zwei Tagen) zu beantworten, darunter beispielsweise „Kleine Anfragen“ aus dem Bundestag oder Ressortabstimmungen für Gesetze, die in der Zuständigkeit anderer Ressorts liegen. Die überwiegende Mehrheit der Anfragen musste laut PTB innerhalb von ein oder zwei Wochen behandelt werden. Dabei habe sie oftmals die spezielle wissenschaftlich-technische Expertise aus den Fachabteilungen der PTB eingebracht. Beispiele hierfür seien Stellungnahmen zu aktuellen politischen Themen wie Industrie 4.0 sowie die Sichtung und ggf. Kommentierung von EU-Dokumenten (Richtlinien-Entwürfe, Ratsarbeitsdokumente, Schlussfolgerungen des Rates).

Einen Sonderfall stellt laut Selbstbericht der Fachbereich Q.5 „Technische Zusammenarbeit“ dar, der regelmäßig und in zunehmendem Maße vom BMZ beauftragt wird, Projekte im Rahmen der Technischen Zusammenarbeit mit Entwicklungs-, Schwellen- und Transformationsländern durchzuführen. Seit Februar 2006 erfolgt die Beauftragung auf der Grundlage einer Vereinbarung zwischen BMZ und PTB. In den letzten drei Kalenderjahren wurden von der

PTB insgesamt 78 Projekte des BMZ mit einem Ausgabengesamtvolumen von rund 35 Mio. Euro bearbeitet (vgl. A.I.4.d).

Darüber hinaus erhält die PTB auch Anfragen von den Eichbehörden der Länder, den Polizei- und Ordnungsbehörden der Kommunen sowie von Amts- und Oberlandesgerichten in Fällen, in denen die technische Expertise der PTB als Obergutachterin (z. B. bei sich widersprechenden Aussagen anderer Gutachten) benötigt wird. Als Extrembeispiel führt die PTB hier die Verkehrsüberwachungsgeräte an, zu denen in den letzten drei Jahren 1.100 Anfragen im Zusammenhang mit Gerichtsverfahren eingingen und „gerichtsfest“ zu beantworten waren.

Technologietransfer

Für den Technologietransfer spielen Fachverbände und Kompetenznetzwerke mit stark anwendungsorientierter Ausrichtung eine herausragende Rolle. Das Netzwerk „Ultrapräzise Oberflächenbearbeitung“ UPOB e.V. ist nach Auskunft der PTB eines von wenigen bundesrepublikanischen Netzwerken der Nanotechnologie, das auch nach der Förderphase allein von den insgesamt 34 Mitgliedern seit zehn Jahren getragen wird. Die PTB betont, dass UPOB maßgeblich von ihr unterstützt werde. Ein Themenschwerpunkt der regelmäßig organisierten „*High Level Expert Meetings*“ sei die Diskussion der Ergebnisse von Vergleichsmessungen im Bereich der Asphärenmesstechnik, da viele Produkte – von der Handylinse bis zur EUV-Optik – mit der heutigen kommerziellen Messtechnik nur ungenügend charakterisiert werden können. Darüber hinaus sei die PTB in einer Reihe weiterer Kompetenznetzwerke vertreten, beispielsweise der optischen Industrie, der europäischen Gesellschaft für supraleitende Elektronik und dem Forum Elektromobilität e. V. mit Mitgliedern aus kleinen und mittleren Unternehmen (KMU), dem Verband der Automobilindustrie und der Forschung.

Durch die von ihrer Technologietransferstelle betriebene Patentlizenzierung will die PTB einen *Best practice*-Austausch mit wesentlichen Akteuren der deutschen Patentverwertungsagenturen fördern. Eine regionale Vernetzung ergebe sich am Standort Braunschweig über den regionalen Technologietransferkreis, am Berliner Standort über die Technologiestiftung Berlin und die Verwertungsstellen der TU Berlin und der Charité.

Das Programm „Unterstützung kleiner und mittlerer Unternehmen bei der Umsetzung von Innovationen in den Bereichen Messen, Normen, Prüfen und Qualitätssicherung“ (MNPQ) richtete sich an die Ressortforschungseinrichtungen im Geschäftsbereich des BMWi mit dem Ziel, Ergebnisse von FuE mit hohem wirtschaftlichen Anwendungspotenzial in Zusammenarbeit mit KMU zeitnah in marktgerecht aufbereitete innovative Produkte, Verfahren und Dienstleistungen einfließen zu lassen und damit den Technologietransfer zu stärken. Die auf ein bis drei Jahre ausgelegten Projektvorschläge wurden von

einer Jury bewertet. Das Programm war mit einer Fördersumme von insgesamt 3 Mio. Euro pro Jahr ausgestattet. Die Summe der Förderung von Projekten der PTB aus dem MNPQ-Programm belief sich im Jahr 2015 auf 1,2 Mio. Euro. Während der Laufzeit von MNPQ-Transfer von 2006 bis 2014 wurden insgesamt 60 Technologietransferprojekte in der PTB gefördert.

Seit 2016 sind Mittel in den entsprechenden Titeln des PTB-Haushalts für Maßnahmen des Technologietransfers veranschlagt. Die PTB nutzt die Mittel nach eigenen Angaben für ein internes wettbewerbliches Programm zum Technologietransfer. Ziel dieses Programms TransMeT „Transfer von metrologischer Technologie“ ist die Förderung von gemeinsamer vorwettbewerblicher FuE zwischen der PTB und externen Partnern. Hierdurch soll das vorhandene metrologische Know-how der Bundesanstalt mit Blick auf eine breitere Verwertung weiterentwickelt und zugleich die Forschungsbasis und Wettbewerbsfähigkeit insbesondere von KMU gestärkt werden. Je Projekt ist maximal ein PTB-Anteil von 350 Tsd. Euro möglich, sofern ein Fachbereich beteiligt ist. Bei einer Beteiligung von zwei Fachbereichen erhöht sich die Obergrenze auf 550 Tsd. Euro. Im Antrag muss der interdisziplinäre Charakter der Arbeiten in der PTB erkennbar sein. Die auf bis zu drei Jahre ausgelegten Projektvorschläge werden von einer internen Jury bewertet, deren Zusammensetzung je Antragsrunde wechselt. Die ersten Antragsrunden in der PTB (September 2015, März 2016) sind laut Selbstbericht sehr gut angenommen worden. Die PTB erwartet vom TransMeT-Programm eine eher noch höhere Wirkungskraft als bei MNPQ-Transfer, da nicht nur mit KMU zusammengearbeitet werden könne, sondern auch mit externen Partnern wie dem Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung. Sie hofft, dass dieses Programm mittelfristig erhalten bleibt und ggf. noch ausgebaut werden kann.

Zudem ist die PTB auf ausgewählten Fachmessen (z. B. Control, Sensor+Test, Laser, Opatec) regelmäßig vertreten, um direkte Firmenkontakte aufzubauen und zu pflegen.

Sonstige Dienstleistungen

Die PTB bietet der Industrie auch Dienstleistungen direkt an, z. B. im *High-End* Bereich von Koordinatenmessgeräten, mittels Präzisionsmessungen des thermischen Ausdehnungskoeffizienten von *High-Tech*-Materialien, mit der Bereitstellung der laut Bundesanstalt weltweit genauesten Messstände zur Kalibrierung von Solarzellen und zur Charakterisierung von LEDs, des international leistungsfähigsten Messstandes zur Wärmezählercharakterisierung, im Bereich der Antennenmesstechnik, der Waagen u.a.m.

II.3 Kooperationen

Die PTB kooperiert im Inland auf vertraglicher Grundlage in bilateralen FuE-Projekten mit 27 Hochschulen, 20 außeruniversitären Forschungseinrichtun-

gen insbesondere der Helmholtz-Gemeinschaft und der Max-Planck-Gesellschaft sowie mit 62 Wirtschaftsunternehmen. Hinzu kommen vertraglich gestützte bilaterale FuE-Zusammenarbeiten mit zehn Verbänden und zwei Behörden. Im Rahmen von Verbundforschungsprojekten bestehen 113 Kooperationsverträge der PTB mit deutschen Partnern aus den genannten Sektoren. Mit zahlreichen Partnern aus diesen Bereichen bearbeitet die PTB darüber hinaus auch bilaterale und Verbundforschungsprojekte ohne vertragliche Basis. Insbesondere im Rahmen von Verbundforschungsprojekten, in kleinerem Umfang auch in bilateralen FuE-Projekten kooperiert die PTB überdies mit Hochschulen, außeruniversitären Forschungseinrichtungen, Wirtschaftsunternehmen, Verbänden und internationalen Organisationen weltweit. Auch diese Zusammenarbeit findet teilweise auf vertraglicher Grundlage statt. Bilaterale Kooperationen ohne vertragliche Regelung umfassen laut PTB in der Regel die Durchführung komplementärer Experimente, die Aufteilung von Entwicklungsarbeiten oder theoretischen Untersuchungen einerseits und experimentellen Messungen andererseits auf die beiden Partner, die Nutzung von Forschungsinfrastrukturen eines der Partner für gemeinsam durchgeführte Experimente oder Entwicklungsarbeiten und/oder längere wissenschaftliche Gastaufenthalte von Beschäftigten bei der jeweiligen Partnereinrichtung.

Mit der TU Braunschweig ist die PTB nach eigenen Angaben in Forschung, Lehre und Nachwuchsförderung sowie über zwei gemeinsame Berufungen eng verbunden. Dies kommt auch darin zum Ausdruck, dass die Metrologie seit kurzem zu den vier Forschungsschwerpunkten dieser Universität gehört. Mit der TU Berlin arbeitet die PTB seit langem in der Lehre zusammen. Im Jahr 2016 wurde eine Rahmenvereinbarung geschlossen, um gemeinsame Berufungen zu ermöglichen, für die derzeit zwei Ausschreibungen laufen.

Von besonderer Bedeutung ist laut PTB die Zusammenarbeit mit Nationalen Metrologieinstituten (NMI) anderer Länder. Als die fünf wichtigsten internationalen Kooperationspartner auf fachlich-technischer wie politischer Ebene nennt die PTB:

- _ das *National Physical Laboratory, NPL*, Großbritannien
- _ das *National Institute for Standards and Technology, NIST*, USA
- _ das *National Institute of Metrology, NIM*, China
- _ das *Laboratoire national de métrologie et d'essais, LNE*, FR
- _ das Eidgenössische Institut für Metrologie, METAS, Schweiz

Die Zusammenarbeit mit anderen NMI findet zum einen in bilateralen Projekten und zum anderen im Rahmen europäischer und internationaler metrologischer Netzwerke statt, insbesondere im Rahmen der Internationalen Meterkonvention mit dem *Bureau International de Poids et Mesures (BIPM)* als Geschäftsstelle und des als Aufsichtsgremium und wissenschaftliches Lenkungs-gremium fungierenden *Comité International de Poids et Mesures (CIPM)*, in dem die Leitung der PTB von 2004 bis 2010 die Präsidentschaft übernommen

hatte und seit Anfang 2015 die Vizepräsidentschaft inne hat. Leitungsfunktionen übernimmt die PTB auch in den beratenden Komitees, insbesondere im *Consultative Committee for Units* (CCU) des CIPM, das insbesondere für die Koordination aller Aktivitäten in Bezug auf die für 2018 vorgesehene grundlegende Revision des internationalen Systems der Einheiten, SI, verantwortlich ist. Darüber hinaus ist die PTB in den weiteren neun *Consultative Committees* der Organisation vertreten und übt dort nach eigenen Angaben insbesondere durch ihre wissenschaftlichen Beiträge Einfluss auf die Entwicklung des internationalen Einheitensystems aus. Zudem gehört die PTB zu den Gründungsmitgliedern der seit 1987 bestehenden *European Association of National Metrology Institutes* (EURAMET) |⁶¹, die vor allem die Kooperation auf dem Gebiet der metrologischen Forschung sowie die Durchführung messtechnischer Vergleiche, gegenseitige Prüfung der Qualitätsmanagementsysteme und Durchführung von Peer-Evaluierungen zur Gewährleistung einer einheitlichen Metrologie-Infrastruktur zu ihren Aufgaben zählt (vgl. A.I.7). Ein weiteres Ziel von EURAMET besteht im Anschluss der nationalen Normale an die primären Realisierungen der größeren Institute (*traceability provision*); hier sei die PTB oftmals die einzige europäische Stelle, die anderen Einrichtungen für deren international anerkannte Kalibrierdienstleistungen die Rückführung auf das internationale Einheitensystem ermögliche. Das EURAMET-Sekretariat ist dauerhaft bei der PTB angesiedelt. EURAMET ist zudem die Durchführungsorganisation für die europäischen Metrologieprogramme EMRP und EMPIR.

Seit 2005 verfolgen die Forschung betreibenden NMI in Europa das gemeinsame Forschungsprogramm EMRP bzw. seit 2014: EMPIR |⁶² (vgl. A.I.4.d); der Vorsitz des EMRP-Komitees lag von 2010 bis 2015 bei einem Präsidiumsmitglied der PTB. Die strategische Verbundforschung in den europäischen Metrologieprogrammen ermöglicht laut PTB, Europa-relevante Interessengebiete fachspezifisch und auch längerfristig zu bearbeiten sowie neue Themen aufzugreifen. Sie bilde damit eine wichtige Basis, um die Fragmentierung der Förderung innerhalb der europäischen Forschungslandschaft zu überwinden, Synergien zu nutzen und Kompetenznetze innerhalb Europas zu schaffen.

Eingebunden ist die PTB überdies in Netzwerke des gesetzlichen Messwesens, die *Organisation Internationale de Métrologie Légale* (OIML) |⁶³ sowie die *European Cooperation in Legal Metrology* (WELMEC). Weiterhin sind Beschäftigte der PTB,

|⁶¹ Bis 2007: EUROMET; seither EURAMET e. V. als eingetragener Verein deutschen Rechts, der – anders als die Vorgängerorganisation – Verträge abschließen sowie europäische Fördermittel entgegennehmen und verwalten kann.

|⁶² EMPIR – *European Metrology Programme for Innovation and Research*; EMRP – *European Metrology Research Programme*.

|⁶³ Die PTB stellt seit 2010 den Vizepräsidenten im Aufsichtsgremium der OIML, dem *Comité International de Métrologie Légale*.

teilweise in leitender Funktion, in mehr als 500 internationalen Ausschüssen vertreten, überwiegend aus dem Bereich der Normung. Hinzu kommen Mitgliedschaften, teilweise verbunden mit Leitungsfunktionen, in Komitees regelmäßig stattfindender internationaler Fachkonferenzen (z. B. *International Conference on Precision Electromagnetic Measurements*), in Kuratorien wissenschaftlicher Einrichtungen, |⁶⁴ in Herausgeberkreisen wissenschaftlicher Zeitschriften (z. B. *Board of Directors* von „Metrologia“) sowie in Fachverbänden und deren Gremien (z. B. Deutsches Institut für Normung, DIN).

Die PTB verfügt über ein Gastwissenschaftlerprogramm, das es ausländischen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern ermöglicht, Forschungsaufenthalte an der Bundesanstalt zu absolvieren. Ausländischen Gästen kann die PTB eine Aufwandsentschädigung zukommen lassen. |⁶⁵ Jährlich kommen etwa 70 externe Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler, Promovierende oder Gäste, die sich im Rahmen der technischen Zusammenarbeit an der PTB aufhalten, für Aufenthalte von einigen Tagen bis Jahren an die Einrichtung. Beschäftigte der PTB haben ihrerseits die Möglichkeit, Gastaufenthalte in Einrichtungen des In- und Auslandes zu absolvieren. Im Zeitraum 2011 bis 2015 nutzten durchschnittlich 23 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter pro Jahr diese Möglichkeit, um Forschungsaufenthalte zwischen einer Woche und einem Monat Dauer an anderen Forschungseinrichtungen durchzuführen. Insgesamt 22 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter der PTB absolvierten Forschungsaufenthalte von mehr als einem Monat an anderen Einrichtungen. In vier Fällen lag die Dauer des Aufenthalts an der Gasteinrichtung zwischen sechs Monaten und über einem Jahr.

II.4 Qualitätssicherung

Die PTB verfügt seit 1995 über ein formalisiertes System der Qualitätssicherung nach DIN/EN/ISO 17025. Das heutige integrierte Qualitätsmanagementsystem (QMS) umfasst nach Auskunft der PTB alle Tätigkeitsbereiche in der metrologischen Forschung und Entwicklung, der Darstellung, Bewahrung und Weitergabe der gesetzlichen Einheiten, der Durchführung metrologischer Prüfungen, der Konformitätsbewertung von Messgeräten, Zulassungen und Genehmigungen sowie der Erbringung von Kalibrier- und Messleistungen für den industriellen und wissenschaftlichen Einsatz. Im Rahmen des QMS werden die entsprechenden internen und externen Prozesse zur Absicherung der Qualität der metrologischen Leistungen definiert.

| ⁶⁴ Max-Planck-Institut für Quantenoptik, Max-Planck-Institut für Kernphysik, *SLAC National Accelerator Laboratory* an der Stanford University/USA und die Forschungsorganisation RIKEN/Japan.

| ⁶⁵ Diese wird aus einem speziellen Haushaltstitel oder über Projekte des Bundesministeriums für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung finanziert.

Die PTB betont, dass das QMS einem kontinuierlichen internen Selbstbewertungsprozesses durch das Management unterliegt, wobei regelmäßig externe Gutachterinnen bzw. Gutachter aus den Metrologieinstituten Österreichs (BEV) und der Schweiz (METAS) einbezogen werden und diese teilweise den Vorsitz der Auditteams übernehmen. Die Grundsätze zum Qualitätsmanagement sind in der Selbsterklärung des Präsidenten enthalten, die die PTB auf ihrer Website veröffentlicht.

Seit 2001 sind die Verfahrensgrundsätze zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis in das QMS der PTB integriert und seither laut Selbstbericht kontinuierlich an die ergänzten DFG-Empfehlungen aus dem Jahr 2013 sowie die Empfehlungen zur Wissenschaftsfreiheit und Wissenschaftsverantwortung im Umgang mit sicherheitsrelevanter Forschung |⁶⁶ von 2014 angepasst worden. Die Einhaltung der Grundsätze zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis ist Gegenstand der jährlichen internen Audits und der Managementbewertung.

Externe Prozesse der Qualitätssicherung

Das „*Mutual Recognition Arrangement*“ des *Comité International des Poids et Mesures* (CIPM-MRA) ist ein multilaterales Abkommen zur Sicherung des weltweiten Vertrauens in die Qualität und Richtigkeit der Messungen und Dienstleistungen der NMI. Es basiert auf einem intensiven Austausch von Forschungsergebnissen, der Offenlegung von Ergebnissen und Messmöglichkeiten, umfangreichen internationalen Vergleichsmessungen und dem Nachweis eines QMS, das den international normierten Kompetenzanforderungen an Laboratorien entspricht.

Die Vereinigung der europäischen Metrologieinstitute EURAMET hat in diesem globalen Gefüge die Funktion einer „*Regional Metrology Organization*“ (RMO). Innerhalb von EURAMET werden im *Peer Review*-Verfahren die Einträge der Mess- und Kalibriermöglichkeiten der PTB evaluiert. Die Ergebnisse der Schlüsselvergleichsmessungen werden in den entsprechenden Datenbanken des BIPM veröffentlicht. Weiterhin werden die QMS der nationalen Metrologieinstitute regelmäßig evaluiert. In einem zweiten Schritt findet eine Evaluierung neuer und bestätigter Einträge durch andere RMO statt, z. B. dem *Asia-Pacific Metrology-Program* oder dem *Sistema Interamericano de Metrologia*. Ergänzt wird dies durch das Instrument der *on-site visits by peers*, also der gelegentlichen Begehung eines Labors durch Expertinnen und Experten anderer Institute. Die

|⁶⁶ DFG und Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina e.V. haben gemeinsame Empfehlungen zur Wissenschaftsfreiheit und Wissenschaftsverantwortung im Umgang mit sicherheitsrelevanter Forschung zur sogenannten „*Dual-Use-Problematik*“ formuliert.

PTB betont, dass die in diesem Rahmen durchgeführten internationalen Schlüsselvergleiche der Mess- und Kalibriermöglichkeiten substantiell Ressourcen bänden und durch die Offenlegung der wissenschaftlich-technischen Fähigkeiten in der öffentlich zugänglichen Datenbank des BIPM einen fundierten Kompetenz- und Qualitätsnachweis darstellten (vgl. A.I.3).

A.III ORGANISATION UND AUSSTATTUNG

III.1 Organisation

III.1.a Koordination zwischen Ressort und Institut

Das BMWi übt die Dienst- und die übergreifende, koordinierende Fachaufsicht über die PTB aus. Zudem besteht insbesondere bei gesetzlichen Aufgaben eine Teilfachaufsicht durch die jeweils für den Rechtsbereich zuständigen Ministerien. |⁶⁷ Die Zusammenarbeit und der Informationsaustausch zwischen BMWi und PTB gelingen nach Einschätzung der Bundesanstalt im Allgemeinen hervorragend. Dabei habe sich u. a. die Zielvereinbarung, die zwischen BMWi und PTB jeweils für einen mittelfristigen Zeitraum geschlossen wird (aktuell 2015 bis 2019), als probates Instrument erwiesen.

Gleichwohl sieht die Bundesanstalt noch erheblichen Verbesserungsbedarf bei der vom Bundeskabinett beschlossenen analogen Anwendung des Wissenschaftsfreiheitsgesetzes auf Einrichtungen der Ressortforschung im Allgemeinen und die PTB im Speziellen. Dies betreffe unter anderem die Erleichterung von gemeinsamen Berufungen mit Hochschulen, die Gewährung von Gewinnungszulagen und bauliche Fragen. Entsprechende Anträge der PTB, die seitens des BMWi regelmäßig unterstützt würden, scheiterten vielfach an der Intervention anderer Ressorts. Erhöhten Flexibilitätsbedarf und eine bessere Anpassung von Prozessen und Arbeitsweisen an den universitären und außeruniversitären Forschungsbetrieb sieht die PTB zudem in ihren forschungintensiven Bereichen wie z. B. QUEST und im neu geschaffenen Theorie-Institut „Fundamentale Physik für Metrologie“ (FPM).

III.1.b Organisationsstruktur und Leitung

Die PTB verfügt über acht Fachabteilungen, in denen zu unterschiedlichen Anteilen FuE-Arbeiten betrieben sowie gesetzliche und Dienstleistungsaufgaben wahrgenommen werden (zu den Aufgaben der Fachabteilungen vgl. Anhang 8).

| ⁶⁷ Dabei handelt es sich um das Bundesministerium für Arbeit und Soziales (BMAS), das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL), das Bundesministerium für Gesundheit (BMG), das Bundesministerium des Inneren (BMI), das Bundesministerium für Umweltschutz, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB), das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) und das BMZ.

Hinzu kommen eine Abteilung für wissenschaftlich-technische Querschnittsaufgaben (Abteilung Q) |⁶⁸ und eine Verwaltungsabteilung. Die zunehmende Komplexität und Interdisziplinarität der Aufgaben und eine intensivere thematisch orientierte Zusammenarbeit auf europäischer Ebene insbesondere in den Metrologie-Forschungsprogrammen EMRP und EMPIR haben die PTB bewogen, ergänzend zur traditionellen Abteilungsstruktur matrixartige Strukturen einzuführen, die eine programmorientierte Steuerung erlauben. So ist das Arbeits- und Forschungsprogramm der PTB programmorientiert ausgerichtet (vgl. A.I.4.b). Matrixartige Strukturen gibt es derzeit zudem für die Bereiche Nanotechnologie, Durchfluss, Energie und Medizinische Messtechnik. Ein Bedeutungszuwachs zeichne sich diesbezüglich auch für die Themen Bio-Chemie, Mathematik und Simulationsrechnungen ab.

Darüber hinaus wurde, wie im Mess- und Eichgesetz vorgesehen, an der PTB eine Konformitätsbewertungsstelle für Messgeräte (vgl. A.I.5) eingerichtet sowie der Regelermittlungsausschuss (REA) und der Ausschuss der (deutschen) Konformitätsbewertungsstellen. Die Geschäftsstellen der Ausschüsse sind bei der PTB angesiedelt.

An der Spitze der PTB steht die Präsidentin bzw. der Präsident, die bzw. der in der Regel von außen berufen wird. Das Kuratorium der PTB (siehe unten) nennt dem BMWi, z. B. auf Vorschlag einer aus seinem Kreis gebildeten Findungskommission, geeignete Kandidatinnen und Kandidaten; eine öffentliche Ausschreibung fand bisher nicht statt. Die Ernennung erfolgt dann auf Vorschlag des BMWi durch die Bundespräsidentin bzw. den Bundespräsidenten.

Die Präsidentin bzw. der Präsident wird von einer Vizepräsidentin oder einem Vizepräsidenten unterstützt, die bzw. der in der Regel intern ausgewählt wird. Gemeinsam mit einer bzw. einem weiteren Beschäftigten (Mitglied des Präsidiums) bilden diese drei das Präsidium der PTB, das sich die Zuständigkeit für die unterschiedlichen Geschäftsbereiche der Einrichtung teilt. |⁶⁹ Unterstützt wird das Präsidium durch eine Stabsstelle, in der leitungsrelevante Querschnittsaufgaben gebündelt sind und die als zentrale Ansprechpartnerin für die Fachaufsicht im BMWi fungiert.

Das Präsidium wird bei der Leitung der PTB durch die Direktorenkonferenz unterstützt, der neben dem Präsidium die zehn Abteilungsleitungen angehören. Für abteilungsübergreifende und besonders wichtige Aufgaben richtet das

|⁶⁸ Hier sind unter anderem die drei Fachbereiche Gesetzliches Messwesen und Technologietransfer, Informationstechnologie und technische Zusammenarbeit angesiedelt; bei letzterem handelt es sich um den drittmittelstärksten Bereich der PTB.

|⁶⁹ Aktuelle Aufgabenteilung des Präsidiums: Präsident/in: Geschäftsbereich „Grundlagen der Metrologie“; Vizepräsident/in: Geschäftsbereiche „Metrologie für die Gesellschaft“, „Metrologie für die Wirtschaft“; Mitglied des Präsidiums: „Internationale Angelegenheiten“.

Präsidium zusätzlich Ausschüsse ein, in denen die für komplexere Sachverhalte erforderlichen ausführlicheren Beratungen erfolgen, um Entscheidungen der Direktorenkonferenz vorzubereiten. |⁷⁰

Das Kuratorium berät die PTB und das BMWi in Fragen, die die Bundesanstalt betreffen, insbesondere bei wissenschaftlichen und technischen Fragen und bei der strategischen Ausrichtung. Das Gremium besteht aus maximal 30 auf Vorschlag des Kuratoriums persönlich durch das BMWi berufenen Mitgliedern aus Wissenschaft und Wirtschaft. Die Mitgliedsdauer beträgt fünf Jahre, eine Wiederberufung ist zulässig. Präsidentin bzw. Präsident des Kuratoriums ist die jeweils fachlich zuständige Abteilungsleitung des BMWi, die Vertretung wird von den Mitgliedern gewählt. Das Kuratorium tagt mindestens einmal jährlich sowie auf Verlangen der Mehrheit seiner Mitglieder oder der Präsidentin bzw. des Präsidenten der PTB. An den Kuratoriumssitzungen teilnehmen können auch das Präsidium und die Abteilungsleitungen der PTB, Beauftragte des BMWi und geladene Gäste. Einzelne Mitglieder des Kuratoriums beraten die PTB zudem nach Absprache. Das Kuratorium kann Ausschüsse einsetzen. |⁷¹

Zur Entwicklung von Strategien und zur operativen Abstimmung im Bereich Explosionsschutz besteht ein gemeinsamer Lenkungskreis von PTB und BAM, Berlin, unter Vorsitz der BAM. Abstimmungen zwischen mehreren zuständigen Einrichtungen finden auch im „Netzwerk Metrologie in der Chemie“ unter Leitung der PTB statt. Diesem Netzwerk gehören neben der PTB derzeit die BAM, das Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit (BVL), das Umweltbundesamt (UBA) und die Deutsche Vereinigte Gesellschaft für Klinische und Laboratoriumsmedizin (DGKL) an.

III.2 Ausstattung

III.2.a Personal

Zum 31. Dezember 2015 verfügte die PTB über 1.273,5 Stellen (VZÄ), darunter 326,0 Stellen für wissenschaftlich Beschäftigte (vgl. Anhang 2), von denen 308,5 VZÄ zum Stichtag besetzt waren. Darüber hinaus verfügte die Bundesanstalt über 181,0 drittmittelfinanzierte Stellen (VZÄ) für Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler sowie 104,0 Stellen (VZÄ) für wissenschaftliches Personal, die aus Aushilfs-/Annexstiteln finanziert wurden (vgl. Anhang 3). Insgesamt waren zum Stichtag 1.915 Personen an der PTB tätig, darunter 141 Auszubilden-

|⁷⁰ Aktuell gibt es sieben Ausschüsse zu folgenden Aspekten: Forschungsprogramme, IT-Dienstleistungen, Investitionen, Internationale Zusammenarbeit, Metrologische Dienstleistungen, Personal, Qualitätsmanagement. Die Ausschüsse verfügen über eigene, ähnlich strukturierte Geschäftsordnungen.

|⁷¹ Dazu gehören insbesondere der permanent eingerichtete Ergänzungsausschuss, der Vorschläge für neue Mitglieder des Kuratoriums erarbeitet, sowie die befristet eingesetzte Findungskommission für die Nachbesetzung des Präsidentenamtes der PTB.

de. Die unter dem wissenschaftlichen Personal am stärksten (81 %) vertretene Fachrichtung ist die Physik (vgl. Anhang 4). Nach Angaben der PTB sind rund 80 % des am Institut tätigen wissenschaftlichen Personals männlich. Knapp 44 % der Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler sind seit weniger als fünf Jahren an der PTB beschäftigt.

Im Zuge der gesetzlichen Stelleneinsparungen musste die PTB im Zeitraum von 1993 bis 2014 insgesamt 450 Planstellen einsparen, darunter 120 Planstellen für wissenschaftliche Beschäftigte.

Im Rahmen der analogen Anwendung des Wissenschaftsfreiheitsgesetzes auf die Ressortforschungseinrichtungen des Bundes kann die PTB seit 2013 auf die Ausweisung verbindlicher Stellenpläne für Tarifbeschäftigte verzichten. Aufgrund des Pilotprojekts in der BAM hat die PTB mit Inkrafttreten des Haushalts 2014 zunächst bei der Titelgruppe 04 für Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler im Bereich der Durchführung von Aufträgen anderer Bundesbehörden oder Dritter (Drittmittelvorhaben) auf die Verbindlichkeit des Stellenplans verzichtet, um erste Erfahrungen mit diesem Instrument zu sammeln. Diese bewertet die PTB positiv; bis 2015 konnte die Anzahl der drittmittelfinanzierten Dauerbeschäftigungen von 24 auf 36 angehoben werden. Eine vollständige Aufhebung des Stellenplans für Tarifbeschäftigte mit wissenschaftlich-technischen Aufgaben im Stammhaushalt strebt die PTB derzeit nicht an, da sie die durch die begrenzte Aufhebung des Stellenplans gewonnene personalwirtschaftliche Flexibilität für ausreichend erachtet.

Seit 2014 verfügt die PTB über einen internen Stellenpool mit etwa zehn Dauerstellen für wissenschaftliches Personal. Um diese Stellen können sich alle befristet beschäftigten, promovierten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler bewerben, die seit mindestens zwei Jahren an der PTB beschäftigt sind. Die Vergabe erfolgt in einem wettbewerblichen Verfahren, in dem neben der wissenschaftlichen Qualifikation auch führungs- und kommunikative Kompetenzen bewertet werden. Erfolgreiche Beschäftigte durchlaufen ein zweijähriges Trainee-Programm mit in der Regel vier Stationen. Die Inhalte des Trainee-Programms können individuell auf die Zielstellen abgestimmt werden und müssen Einsätze im Bereich FuE und im Bereich Dienstleistungen enthalten. Die Einsatzzeiten werden durch Qualifizierungsmaßnahmen ergänzt, z. B. zu Qualitäts- und Projektmanagement. Zudem sind Ausbildungsstationen in Managementbereichen wie dem präsidentialen Stab der PTB vorgesehen. Nach einer Evaluation des ersten Durchlaufs im Jahr 2016 wird dieses Programm mit geringfügigen Modifikationen fortgeführt.

Leitungsstellen unterhalb des Präsidiums (Abteilungs- und Fachbereichsleitungen) werden intern, teilweise auch extern ausgeschrieben. Gemeinsame Berufungen, die für diese Leitungsebene möglich sind, können in Niedersachsen inzwischen nach drei unterschiedlichen Modellen durchgeführt werden: Abordnungsmodell (ähnlich Berliner Modell), Beurlaubungsmodell (Jülicher

Modell) und Berufung in die mitgliedschaftsrechtliche Stellung einer Hochschullehrerin bzw. eines Hochschullehrers (Thüringer Modell). In der Kooperationsvereinbarung zwischen PTB und TU Braunschweig sind alle drei Optionen verankert. Dagegen ist die Anwendung des Thüringer Modells für den Berliner Standort der PTB nicht möglich; ein vorgesehener Rahmenvertrag zu gemeinsamen Berufungen zwischen der PTB und der TU Berlin konnte bislang nur mit Verzögerungen zur Unterschriftsreife gebracht werden.

In jüngerer Zeit konnten drei gemeinsame Berufungen, darunter die Berufung auf eine Juniorprofessur, mit der TU Braunschweig und der Universität Hannover erfolgreich durchgeführt werden. Eine *Tenure track*-Option ist mit der Juniorprofessur nicht verbunden, im Rahmen der Nachbesetzung zukünftig frei werdender Dauerstellen und des oben skizzierten Stellenpool-Programms können sich aber laut PTB Perspektiven eröffnen.

In anderen Fällen scheiterten gemeinsame Berufungen laut PTB an finanziellen Rahmenbedingungen. Gewinnungszulagen zur Anhebung von Gehältern dürfen nur befristet bezahlt werden, wodurch die PTB Ressortforschungseinrichtungen bei der Gewinnung hochqualifizierter Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler im Vergleich zu anderen außeruniversitären Forschungseinrichtungen und Universitäten benachteiligt sieht.

Nach eigenen Angaben fällt es der PTB auch auf den Ebenen unterhalb der Leitung zunehmend schwer qualifizierte Beschäftigte zu gewinnen; dies gelte vor allem für den Bereich der Ingenieurinnen und Ingenieure sowie der Technikerinnen und Techniker. Die Ursachen hierfür sieht die Einrichtung insbesondere in den gesunkenen Bewerberzahlen von Absolventinnen und Absolventen naturwissenschaftlich-technischer Studien- und Ausbildungsgänge, gestiegenem Personalbedarf in der Wirtschaft und dem im Vergleich zur Wirtschaft niedrigen Vergütungsniveau.

Rund 80 % der Bewerbungen für naturwissenschaftlich-technische Stellen in der PTB kommen von Männern. Der Frauenanteil an den Leitungspositionen liegt derzeit bei 14 % und damit laut PTB über dem Frauenanteil an den Studierenden der entsprechenden Geburtsjahrgänge. Um sich langfristig dem Ziel eines ausgeglichenen Geschlechterverhältnisses anzunähern, hat die PTB ihre Angebote zur Vereinbarkeit von Familie und Beruf ausgebaut. |⁷² Im Rahmen eines Audits wurde die PTB 2015 als familienfreundliche Arbeitsgeberin zertifiziert.

Im Zeitraum von 2011 bis 2015 haben fünf wissenschaftliche Beschäftigte die PTB verlassen, um eine Berufung auf eine Professur anzunehmen, ein weiterer

|⁷² So hat sie z. B. eine eigene Kindertageseinrichtung mit Kinderkrippe und Kindergarten errichtet, Telearbeitsplätze und zahlreiche Varianten für Teilzeitarbeitsmöglichkeiten geschaffen.

Mitarbeiter wechselte auf eine Leitungsfunktion in einer anderen Ressortforschungseinrichtung.

III.2.b Haushalt

Für die PTB gilt das Haushaltsrecht des Bundes. Etwa 90 % der Haushaltsmittel und die meisten Ausgabetitel der Bundesanstalt sind flexibilisiert, d. h. die Titel sind innerhalb ihrer Hauptgruppen voll und zwischen den Hauptgruppen zu 20 % deckungsfähig. Ausgabereste der flexibilisierten Titel sind im nächsten Haushaltsjahr ohne Einsparungen verfügbar, wenn die Restebildung vom Bundesministerium der Finanzen (BMF) als schlüssig akzeptiert wird. Die PTB betrachtet die existierenden Flexibilisierungsmöglichkeiten sowie die Höhe der Grundfinanzierung, abgesehen von der aus ihrer Sicht erforderlichen Verstärkung der Mittel zur Umsetzung der Baumaßnahmen nach dem Liegenschaftskonzept und Masterplan 2016 bis 2035, derzeit als ausreichend. Sie seien geeignet, um aktuelle, in der Regel kurz- oder mittelfristig zu bearbeitende Fragestellung im Rahmen der verfügbaren Mittel aufzugreifen und zu bearbeiten. Die Einstellung zusätzlicher Mittel für neue, langfristig angelegte Aufgaben benötige hingegen im Verfahren der Haushaltsaufstellung einen mehrjährigen Vorlauf. Mit Hilfe eingeworbener Drittmittel könne die PTB das Aufgreifen neuer Aufgabenfelder jedoch beschleunigen.

Im Haushaltsjahr 2015 (Soll) verfügte die PTB über eine Grundfinanzierung in Höhe von rund 173 Mio. Euro. Zusätzlich konnten Drittmiteleinahmen von rund 28,1 Mio. Euro erzielt werden. Darüber hinaus berichtet die PTB über Gebühreneinnahmen und sonstige Entgelte für Prüfungen, Analyse- und Zulassungstätigkeiten von rund 10,9 Mio. Euro, sonstige vermischte Einnahmen in Höhe von rund 1,1 Mio. Euro, darunter Lizenzerlöse in Höhe von 183 Tsd. Euro und sonstige Einnahmen wie z. B. Einnahmen aus Vermietung, Verpachtung und Nutzung in der Summe von ca. 440 Tsd. Euro. Die im Zusammenhang mit Forschungs- und Kooperationstätigkeiten stehenden sonstigen Einnahmen wie Lizenzeinnahmen und Personalkostenerstattungen können zur Verbesserung der Forschungstätigkeiten in der PTB verbleiben. Die Gebühreneinnahmen werden, wie grundsätzlich bei allen Bundesbehörden, an das Bundesministerium der Finanzen (BMF) abgeführt bis auf die Hälfte des über 11,7 Mio. Euro hinausgehenden Betrages, der in der PTB verbleibt und für die Nachwuchsförderung wie das Doktorandenprogramm verwendet wird. Mehreinnahmen bei den Gebühren wurden im Jahr 2015 nicht erzielt, weil der Schwellwert von 11,7 Mio. Euro nicht überschritten war. Die Summe der Mehreinnahmen aus sonstigen Posten, die in der PTB verblieben, belief sich 2015 (neben den Drittmitteln) auf 325 Tsd. Euro.

Rund die Hälfte (86,4 Mio. Euro) der Ausgaben des Grundhaushalts im Haushaltsjahr 2015 (Soll) waren Personalausgaben, 48,9 Mio. Euro waren sächliche Verwaltungsausgaben, 40,2 Mio. Euro Ausgaben für Investitionen und

0,2 Mio. Euro Zuweisungen und Zuschüsse (ohne Investitionen). Die Höhe der Grundfinanzierung hält die PTB derzeit noch für ausreichend, weist aber darauf hin, dass sich ab 2016 aufgrund unzureichender Haushaltszuwächse (außer für Baumaßnahmen) Probleme abzeichnen werden.

Die PTB hat zum 1. Januar 2000 eine Kosten-Leistungsrechnung etabliert. Innerhalb der PTB erfolgt die Mittelzuweisung auf Basis der Arbeitsplanungsprozesse sowohl bezogen auf die Anzahl der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter als auch strategisch und leistungsorientiert.

III.2.c Forschungsinfrastruktur und Räumlichkeiten

Die PTB betreibt oder beteiligt sich an zahlreichen Forschungsinfrastrukturen, von denen sie folgende aufgrund ihrer Alleinstellung besonders hervorhebt:

- _ In Berlin-Adlershof nutzt die PTB Synchrotronstrahlung am Berliner Elektronenspeicherring BESSY II des Helmholtz-Zentrums Berlin (HZB) und an der PTB-eigenen *Metrology Light Source* (MSL), die ebenfalls vom HZB in enger Abstimmung betrieben wird.
- _ Die PTB-Ionenbeschleunigeranlage PIAF besteht aus einem CV28 Isochron-Zyklotron und ab Oktober 2016 einem 2 MV Tandetronbeschleuniger.
- _ Für die Dosimetrie in der Strahlentherapie betreibt die PTB eine Elektronenbeschleunigeranlage, die aus zwei klinischen Linearbeschleunigern und einem Forschungsbeschleuniger mit zwei Bestrahlungsplätzen besteht.
- _ Für Forschung im Bereich der Metrologie ultraniedriger Magnetfelder steht der begehrte *Berlin Magnetically Shielded Room 2* (BMSR-2) zur Verfügung. Um dem laut PTB in den letzten Jahren deutlich gewachsenen Nutzungsinteresse externer Forscher gerecht werden zu können, hat die PTB kürzlich einen DFG-Antrag für die Einrichtung eines Gerätezentrums an der PTB gestellt.
- _ Die PTB betreibt ein Reinraumzentrum mit 800 m² Fläche der Klasse 5 nach DIN EN ISO 14644-1.
- _ Von großer Bedeutung für zwei europäische Verbundforschungsprojekte sind laut PTB die MN- und die 16,5-MN-Kraft-Normalmesseinrichtungen sowie die 1,1-MN-Drehmoment-Normalmesseinrichtung, die zu den weltweit größten und genauesten Anlagen zählen.
- _ In Berlin betreibt die PTB das europäische Zentrum für die Messung thermischer Energie, vorwiegend für den Energieträger Wasser, das insbesondere mehrere Normalmessenanlagen zur Messung von Durchflüssen in einem weiten Temperatur- und Volumenstrombereich umfasst.
- _ Die PTB ist Mitbegründerin und Partnerin der Berliner Ultrahochfeld *Facility* am Max-Delbrück-Centrum für Molekulare Medizin (MDC). Wichtigstes Forschungsgerät der *Facility* ist ein 7-Tesla-Ganzkörper-Magnetresonanztomograph (7-MRT), der vom MDC und der PTB gemeinsam beschafft wurde und vom MDC betrieben wird. Die PTB verfügt über einen garantierten Messzeitanteil.

- _ Gemeinsam mit der Charité betreibt die PTB seit 2015 einen *Magnetic Particle Imaging (MPI) Scanner*, der im Rahmen der Großgeräteinitiative von der DFG mit knapp vier Millionen Euro finanziert wurde.
- _ Mit dem Kompetenzzentrum „Wind“ unterstützt die PTB die Windenergiebranche und insbesondere auch Dienstleister auf den Gebieten der geometrischen Messtechnik für Bauteilgrößen bis zu 5 m x 4 m x 2 m, Drehmomentmessungen von 5 MN m sowie metrologisch abgesicherte Erfassung von 3D Geschwindigkeitsvektoren in Höhen bis 200 m. Die dazu notwendigen neuen Gebäude sind so ausgelegt, dass z. B. die Drehmomenten-Normalmesseinrichtung bis auf 20 MN m erweitert werden kann.

Insgesamt beläuft sich der Gerätebestand in Braunschweig und Berlin auf ca. 136.000 bzw. 50.600 Anlagen mit einem Anschaffungswert von 375 Mio. Euro bzw. 126 Mio. Euro. Bei einer mittleren jährlichen Abschreibungsquote von 12,5 % müssten jährlich ca. 62 Mio. Euro investiert werden. Dieser Betrag stand in den vergangenen Jahren laut PTB nicht zur Verfügung.

Die PTB stellt ihre größeren Mess- und Forschungseinrichtungen externen Nutzerinnen und Nutzern zur Verfügung. Zusätzlich hat sich die PTB verpflichtet, im Rahmen der europäischen Koordinierung mit anderen metrologischen Instituten eine Reihe von *special facilities* für die gemeinsame Nutzung zu betreiben. |⁷³

Die Liegenschaften der PTB in Braunschweig, Berlin-Charlottenburg und Berlin-Adlershof sind mit 89 Gebäuden bebaut. Die Hauptnutzfläche beträgt insgesamt 102.159 m². Die überwiegende Anzahl der Gebäude der PTB sind speziell für ihre metrologischen Aufgaben errichtet worden. Diese Spezialgebäude haben einen hohen Technikanteil, wobei 21 Gebäude einen Technikanteil von mehr als 40 % haben und weitere 38 Gebäude einen Technikanteil von 30 bis 40 %. Bibliotheken sind sowohl am Standort Braunschweig als auch in Berlin-Charlottenburg vorhanden.

Die Liegenschaften weisen derzeit nach Einschätzung der PTB noch einen im Wesentlichen guten baulichen Zustand auf. Um die Gebäude zu erhalten und den aufgabenbezogenen Erfordernissen entsprechend auszubauen sowie brand- und arbeitsschutzrechtlichen Anforderungen Rechnung zu tragen, wurde ein entsprechendes Programm (Liegenschaftskonzept und Masterplan) für den Zeitraum bis 2035 erarbeitet, das einen Gesamtumfang von derzeit 332 Mio. Euro hat. |⁷⁴ Bestandteil des Liegenschaftskonzeptes ist auch ein fle-

|⁷³ Hierzu gehören z. B. das Reinraumzentrum, der Teilchenbeschleuniger, das Roboter-Goniophotometer, durchstimmbare Lasersysteme für die Photometrie und Synchrotronstrahlungsquellen.

|⁷⁴ Der Gesamtwert der Liegenschaften liegt derzeit bei ca. 320 Mio. Euro. Der Finanzierungsbedarf für die Realisierung des Masterplans wurde auf Grundlage der geplanten Hauptnutzflächen und realistischen aktuellen Quadratmeterpreisen ermittelt.

xibles Laborgebäude im Sinne eines Verfügungsgebäudes, das laut PTB aufgrund der Vielzahl drittmittelfinanzierter Projekte und der sich daraus ergebenden Anforderungen an die flexible Verfügbarkeit hochwertigen Laborraums benötigt werde. Eine Aufstockung des finanziellen Haushaltes zur Umsetzung des Liegenschaftskonzepts hat die PTB nach eigenen Angaben bereits beantragt. Die Erfolgsaussichten schätzt die PTB nach aktuellem Stand als sehr gut ein.

A.IV KÜNFTIGE ENTWICKLUNG

Allgemein sieht die PTB die metrologische Entwicklung und die damit verbundene Veränderung in ihrer Ausrichtung langfristig geprägt durch:

- _ wachsende technische Anforderungen aus Industrie und Gesellschaft, die eine ständige Weiterentwicklung der Normale und Messmöglichkeiten der Bundesanstalt hin zu kleineren Unsicherheiten und erweiterten Parameterbereichen erfordern, beispielsweise in der Mikro- und Nanotechnologie, bei großen Kräften und Drehmomenten, bei der Charakterisierung von großen Zahnrädern, LEDs, Sonnenkollektoren oder Kameras für autonomes Fahren;
- _ die breite Einführung von QMS in der Industrie und die Einbeziehung neuer Messgrößen, mit den damit verbundenen Herausforderungen an die PTB, entsprechende Primär- und TransfERNormale zur Sicherstellung der Rückführung zur Verfügung zu stellen, sowie die zunehmende Digitalisierung von Messgeräten und Messverfahren;
- _ neue wissenschaftliche Erkenntnisse (z. B. in der Quantenoptik, im Bereich ultrakalter Gase oder Spintronics) und neue Technologien (z. B. Quantenlogik, Kühltechniken für Atome oder maschinelles Lernen), die in der PTB für metrologische Anwendungen weiterentwickelt und nutzbar gemacht werden.

Die PTB betont die große Bedeutung von Freiräumen, um den sich abzeichnenden und langfristigen Herausforderungen adäquat begegnen zu können. Nachdem der gesetzliche Stellenabbau und die Stelleneinsparungen aufgrund der Arbeitszeitverlängerung nunmehr ausgesetzt seien, bestehe für die PTB etwas mehr Freiraum für strategische Zukunftsplanungen.

Die PTB erkennt insgesamt großes Potential in der weiteren Koordinierung der metrologischen FuE im Rahmen des europäischen Forschungsprogramms für die Metrologie (EMPIR). Hier würden zunehmend Synergien genutzt und unnötige Duplikationen vermieden sowie die gemeinsame Normung und Standardisierung vorangetrieben. Die Bundesanstalt setze sich für eine systematisch verbesserte Koordination von Dienstleistungen in Europa ein, was allerdings auch aufgrund unterschiedlicher Geschäftsmodelle der NMI sehr schwierig und nur langfristig umzusetzen sein werde. Zu einem ersten Treffen aller Di-

rektorinnen und Direktoren der europäischen NMI habe EURAMET im Oktober 2016 eingeladen.

Die Bereiche Biomedizin und Biochemie sind nach Einschätzung der PTB hinsichtlich rückführbaren, verlässlichen und reproduzierbaren Messmethoden zurzeit noch weitgehend unerschlossen. Dabei würde von verschiedensten Seiten sehr hoher Bedarf prognostiziert, insbesondere hinsichtlich zukünftiger Anforderungen an die personalisierte Medizin. Das entsprechende Konsultativkomitee der Meterkonvention (CCQM) sei in den letzten Jahren stark angewachsen. Die PTB habe eine Expertenkommission zusammengestellt, in denen hochrangige Persönlichkeiten aus Verbänden, Industrie und Wissenschaft den zukünftigen metrologischen Bedarf analysieren sollen. Dieses Gremium repräsentiere zugleich potentielle Nutzergruppen der ggf. zur Verfügung gestellten Dienstleistungen und könnte dann im Sinne eines aktiven Nutzer-Netzwerkes ausgebaut werden.

Insbesondere sei zu erwarten, dass der 2002 empfohlene systematische Ausbau der Chemie weiter fortschreite, nicht zuletzt durch eine weitere Stärkung des nationalen Netzwerkes „Metrologie in der Chemie“ (vgl. A.II.1.b). Die PTB und die BAM sind Teil dieses von der PTB koordinierten Netzwerkes. Die Zusammenarbeit ist vertraglich geregelt, sowohl allgemein (Rahmenvereinbarung) als auch speziell, z. B. für die Bereiche Gasanalytik, Elementanalytik, Umweltanalytik und Fluorometrie. Die PTB hebt hervor, dass die beiden Institute komplementär arbeiteten und sich ergänzten; dies gelte insbesondere für die Entwicklung nationaler Normale. Der aktuelle Stand der Zusammenarbeit wurde vor kurzem in einem Positionspapier von BAM und PTB festgehalten.

Der Quantensensorik wird nach Einschätzung der PTB künftig zunehmend große Bedeutung für die Industrie beigemessen werden. Die Bundesanstalt betreibt seit geraumer Zeit FuE in der Quantenmetrologie hauptsächlich in Zusammenarbeit mit der Universität Hannover, insbesondere durch das gemeinsam ins Leben gerufene QUEST-Institut (vgl. Anhang 8). Zudem entstehe gerade ein gemeinsamer Forschungsbau, das „Hannover *Institute for Technology, HITech*“, und ein im Jahr 2015 genehmigter SFB zur relativistischen Geodäsie (GeoQ) mit Beiträgen der PTB zu hochgenauen optischen Uhren und zur ultra-stabilen langreichweitigen Frequenzübertragung werde etabliert. Die PTB berichtet, dass unter ihrer Federführung im QUEST-Institut darüber hinaus ein weiterer SFB-Antrag zur Ausnutzung von korrelierten Quanteneffekten (z. B. Vielteilcheneffekte und Verschränkung) für Quantenmetrologie der nächsten Generation hervorragend beurteilt worden sei. Metrologie beruhend auf dem Quanten-Hall- und Josephson-Effekt werde weltweit kompetitiv vorangetrieben.

Zur Verbindung von Nano- und Quantenmetrologie, unter anderem zu sogenannten hybriden Systemen, seien auf Initiative der PTB gemeinsam mit der TU Braunschweig und der Universität Hannover verschiedene Anträge eingereicht, und teilweise bereits genehmigt („*Foundation of Physics and Metrology*“),

Spitzenforschung Niedersachsen) worden. International werde dies als eines der vielversprechendsten Gebiete für die nächste industrielle Quantenrevolution angesehen und die „Metrologie-Region“ Niedersachsen habe hier das Potential, so die PTB, sich frühzeitig weltweit sichtbar zu platzieren.

B. Bewertungsbericht

B.1 BEDEUTUNG UND ENTWICKLUNG

Die PTB zählt zu den weltweit führenden Metrologieinstituten und genießt national wie international hohe fachliche Anerkennung. Ihre Kernaufgaben der Darstellung, Bewahrung und Weitergabe physikalischer Einheiten zur Sicherung der internationalen Einheitlichkeit der Maße erfüllt die PTB in sehr guter und in großen Teilen exzellenter Qualität. Besonders hervorzuheben sind die eindrucksvollen Leistungen der Bundesanstalt im Kernbereich der metrologischen Forschung „Zeit und Frequenz“, Quantenmetrologie, Terahertz-Messtechnik und Neubestimmung der SI-Einheiten |⁷⁵, auf denen ihre führende Rolle maßgeblich gründet. Überdies erbringt die PTB wissenschaftsbasierte Dienstleistungen von großer wirtschaftlicher Relevanz im Bereich der Standardisierung, Normung und Qualitätssicherung. Ihre systematische und engagierte Gremienarbeit wird sehr geschätzt. In europäischen und internationalen Gremien gelingt es der Bundesanstalt, nationalen industriellen Standards und Verfahren auch internationale Gültigkeit zu verschaffen, aktuell etwa im Bereich der Sensorik und Strahlungsthermometrie. Insgesamt zeichnet sich die PTB durch eine strategische Stringenz von der Grundlagenforschung bis zur Anwendung aus, die es ihr erlaubt, gesetzliche Aufgaben und aufgabenbezogene Forschung sehr schlüssig zu verknüpfen.

Im Zuge der wirtschaftlichen Digitalisierung (virtualisierte Nutzung von Ressourcen, Industrie 4.0, Internet der Dinge etc.) sollte die PTB eine führende Rolle in der Metrologie für Internet- und Digitalisierungsmessgrößen übernehmen, vor allem in den Bereichen Messwesen, Norm- und Kalibrierungswesen und Referenzgrößen in der Informationstechnik. Zwar gibt es eine Reihe von internationalen Standardisierungsorganisationen (ITU-T, IETF, ICANN, ETSI

| ⁷⁵ *Système international d'unités* (SI): Internationales Einheitensystem für physikalische Größen.

u. a.) |⁷⁶, eine PTB-ähnliche Autorität in der Messtechnik fehlt jedoch in einer zunehmend vernetzten Welt.

Vor diesem Hintergrund werden die Aktivitäten der PTB zum Aufbau der Metrologie für die Digitalisierung mit großem Nachdruck unterstützt. Die vorgesehene Stärkung der „Metrologischen Informationstechnik“ mittels einer Juniorprofessur für „Sichere und vertrauenswürdige netzangebundene Systemarchitekturen“ zusammen mit der TU Berlin wird als ein Schritt in die richtige Richtung bewertet, der aufgrund der hochdynamischen Entwicklung der Forschungs- und Technologiefelder allerdings bei weitem nicht ausreicht. Vielmehr ist es zwingend notwendig, die Aktivitäten mit hoher Priorität auszubauen. Zur Entwicklung einer Digitalisierungsstrategie sollte die PTB ein Expertengremium etablieren. Empfohlen wird der zügige Aufbau mindestens einer Fachabteilung für die digitale Fertigungsmesstechnik (Metrologie im *Smart Facturing*).

Die Komplexität dieser Themenstellung erfordert eine präzise Aufgabenbestimmung für die PTB auch in Abgrenzung zu weiteren relevanten Einrichtungen auf diesem Gebiet. Insbesondere ist auf eine klare Aufgabentrennung zwischen der PTB und dem Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI) zu achten. Empfohlen wird eine Zuständigkeit der PTB für Messarchitekturen, Standardisierung und Normsetzung. Die eingeleitete interministerielle Abstimmung zur Definition und Zuordnung der neuen Aufgaben wird begrüßt. Aufgrund der Dringlichkeit der Thematik sollte diese zügig vorangebracht werden.

B.II ARBEITSSCHWERPUNKTE

II.1 Forschung und Entwicklung

II.1.a Forschungsplanung

Obgleich der Spielraum von Ressortforschungseinrichtungen hinsichtlich Planung und Wandel von Forschungsthemen aufgrund der gesetzlich übertragenen Aufgaben begrenzt ist, misst die PTB forschungsstrategischen Prozessen einen sehr hohen Stellenwert bei und nutzt die vorhandenen Möglichkeiten auf vorbildliche Weise. Dies zeigt sich insbesondere an einer kriteriengestützten Aufgabenpriorisierung für das Arbeits- und Forschungsprogramm. Es gelingt der PTB, durch kluges Veränderungsmanagement einen neuen Bereich

|⁷⁶ ITU-T - *International Telecommunication Union* (ITU) / ITU *Telecommunication Standardization Sector* (ITU-T); IETF - *Internet Engineering Task Force*; ICANN - *Internet Corporation for Assigned Names and Numbers*; ETSI - *European Telecommunications Standards Institute*.

wie die Nanometrologie aufzubauen und bestehende Bereiche, beispielsweise die Tiefsttemperaturmesstechnik, aufzugeben. Diese Strategieprozesse werden auch dadurch unterstützt, dass die PTB frei werdende Dauerstellen ggf. unter präsidialen Vorbehalt stellt und sich damit Spielraum für neue Themen eröffnet. Begrüßenswert ist auch das Vorhaben der PTB, *Foresight*-Prozesse künftig im Rahmen der Direktorenkonferenzen systematisch auszuwerten und zu priorisieren.

Positiv bewertet wird die Strategieplanung in den Themenbereichen der Quantenmetrologie, der Metrologie für den Energiesektor und für die Biomedizin bzw. Biotechnologie. Die Vorlaufforschung zur Quantenmetrologie, insbesondere in Verbindung mit Nanometrologie ist sehr gut aufgestellt und drittmitelstark. Auch in der Metrologie für den Energiesektor ist die PTB auf einem sehr guten Weg. Erwähnenswert ist die Etablierung eines Kompetenzzentrums für Windenergie, für das die PTB 9,5 Mio. Euro eingeworben hat. Die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten der PTB zu biomedizinischen Messverfahren sind sehr gut eingebunden in Kooperationen mit medizinischen Partnern. Da sich zukünftige Bedarfe in der (bio-)medizinischen Bildgebung gegenwärtig nicht exakt abschätzen lassen, ist die Forschungsstrategie in dieser Hinsicht regelmäßig auf den Prüfstand zu stellen.

Eine zentrale Anforderung mit hohem Handlungsdruck stellt die Metrologie für die fortschreitende Digitalisierung dar. Referenz-Messgrößen werden für die digitalisierte Wirtschaft immer wichtiger, die Nachfrage nach Kalibrierungen von digitalen Systemen wird angesichts der dynamischen Entwicklung Cloud-basierter Dienste zunehmend dringlicher. Beispielsweise greift im Rahmen des *Ressource Sharing in Open Ecosystems* eine große Anzahl von Nutzerinnen und Nutzern gemeinsam auf physikalische Ressourcen und netzbasierte Dienstleistungen zu. Kalibrierbare Messungen sind in solchen Umgebungen zukünftig unabdingbar, um etwa *Service Level Agreements* rechtssicher zu überprüfen. Hierzu zählt die Einhaltung und Sicherstellung von vereinbarten Bitraten und Qualitätsmerkmalen im „Internet der Dinge“ oder Industrie 4.0 u.a.m. Im Konfliktfall sollten diese vergleichenden Messtechnologien |⁷⁷ ein autoritatives Eingreifen seitens der PTB ermöglichen, um die Interoperabilität zu gewährleisten. Damit ist das Ziel verbunden, eine Vergleichbarkeit neuer Internetsysteme und Internetdienste zu erreichen und zu gewährleisten. Bei der PTB sollten insbesondere Dienstgütemessungen in der *Cloud* angesiedelt werden, die für Testzwecke digitaler Systeme, die Emulation von Datenverkehrsströmen, die Untersuchung von gemischten multimedialen Anwendungen und deren Zertifizierungsprozesse genutzt werden.

|⁷⁷ Beispielsweise die Messung der Dienstgüte bei gemeinsamer Nutzung einer Kommunikationsinfrastruktur oder der Nachweis der geographischen Abdeckung in Mobilfunknetzen.

Mit der Etablierung einer solchen *Cloud-Metrologie* sollte diesem Bedarf vorlauforientiert begegnet und das gesetzliche Messwesen entsprechend digital gestärkt werden. Die PTB wird nachdrücklich in ihrem Bestreben unterstützt, den Aufbau einer Referenzarchitektur für das sichere Cloud-Computing zu initiieren und in zentraler Funktion zu koordinieren. Dafür kann die PTB bereits auf erste eigene Arbeiten zurückgreifen. Die *Cloud-Metrologie* sollte bestehende Infrastrukturen integrieren und der Umsetzung digitaler Konzepte zur Koordinierung, Konzentration, Vereinfachung, Harmonisierung und Qualitätssicherung von metrologischen Dienstleistungen in Europa für alle Beteiligten dienen.

Auch im Bereich der intelligenten Messsysteme (*smart metering*) gibt es bereits Ansätze in der PTB, die intensiviert werden sollten. Aufgrund des steigenden Anteils von Software bei der Realisierung von Messsystemen gewinnt das Thema der Softwaresicherheit im Zusammenhang mit der Zuverlässigkeit von Messergebnissen zunehmend an Bedeutung. Ein Aspekt dabei ist die Überprüfung der implementierten mathematischen Softwarealgorithmen, was beispielsweise bei der Bestimmung von geometrischen Kenngrößen einen wesentlichen Einfluss auf das Ergebnis hat. Für eine internetbasierte Validierung von Auswertungssoftware gibt es erste Angebote der PTB. Zwei aktuelle Beispiele aus dem Bereich der elektrischen Energiemesstechnik sind das *Smart Meter Gateway* sowie Messgeräte, die die Phasenbeziehungen zwischen örtlich weiträumig auseinanderliegenden Netzströmen und Spannungen messen können.

II.1.b Forschungsleistungen

Themenbereich 1 „Akustik, Ultraschall, Beschleunigung“

_ Akustik und dynamisches Messen

Der Arbeitsbereich zeichnet sich durch einen hohen Anteil gesetzlicher Aufgaben aus, die insgesamt in sehr guter Qualität bearbeitet werden. Dazu gehört die Darstellung und Weitergabe der Einheiten für die Geschwindigkeit, die Beschleunigung sowie für dynamisch gemessene Kraft, Drehmoment und Druck. Zudem werden die Baumuster von Verkehrsmessgeräten, Schussapparaten und Schreckschusswaffen geprüft. Der Bereich ist in vielen Normungsgremien auf nationaler und internationaler Ebene vertreten und wirkt maßgeblich an der Ausarbeitung von Normen und Richtlinien mit. Ferner gehört die wissenschaftliche Bearbeitung von Fragen im Kontext der Dynamik und Kinematik

zum breit gefächerten Aufgabenspektrum. Die hier bearbeiteten Forschungsthemen |⁷⁸ sind von herausragender Bedeutung.

Die Auswahl der Forschungsthemen in diesem Bereich ist grundsätzlich schlüssig, künftig sollten die Arbeiten jedoch stärker in eine übergreifende Strategie eingebunden werden. Hierbei sollte die Behandlung digitaler Komponenten, etwa die Software bei der Schallpegelmessprüfung, mit einer einheitlichen Strategie für die Behandlung solcher Komponenten in Messgeräten verknüpft werden.

Themenbereich 2 „Durchfluss“

_ Durchfluss- und Energiemesstechnik

In seinen Hauptaufgaben der EU-Konformitätsbewertung und der internationalen Zertifizierung von Wärmemengenzählern, Wasserzählern und Messgeräten für Flüssigkeiten außer Wasser ist der Arbeitsbereich weltweit führend. In diesem weiten Anwendungsbereich erstellt die PTB rund 80 % aller Zulassungszertifikate in Europa und ist damit ein sehr wichtiger Partner für die Wirtschaft, vor allem der KMU. Ungeachtet der ausgeprägten Anwendungsorientierung zeichnet sich der Arbeitsbereich durch ein hohes Forschungsengagement mit guten, in Teilen sehr guten Leistungen und umfangreichen Drittmitteln aus.

Grundlage der Arbeiten bilden mehrere weltweit einmalige Prüfstände, vor allem die Wärmezählerprüfstrecke für große Rohre und hohe Durchflüsse mit Rückführung des Volumenstroms auf Zeit und Masse bzw. Dichte sowie eine neue Anlage, die Prüfungen unter realen Einsatzbedingungen von Prozessmessgeräten bei Temperaturen bis 240°C und hohen Drücken erlaubt. Ein Forschungsschwerpunkt bezieht sich auf die Anforderungen realer Einsatzbedingungen und die Verringerung der dort auftretenden Messfehler, die wegen des umfangreichen Einsatzes von Durchfluss- und Wärmemengenzählern große wirtschaftliche Auswirkungen haben. Besondere Bedeutung hat die Sicherung der Messrichtigkeit vor Ort vor allem für den Mineralölsektor, die Automobil- und Flugzeugindustrie sowie den Umwelt- und Verbraucherschutz.

|⁷⁸ Zu den Beispielen aktueller Forschung in diesem Bereich zählen u. a. der Aufbau eines neuen interferometrischen Primärnormals für Ultraschalldruck bis zu hohen Frequenzen mit Heterodyn-Laservibrometer, die Entwicklung und Charakterisierung eines Ohrsimulators zur Kalibrierung von Schallwandlern für das Neugeborenen-Hörscreening im Rahmen einer europaweiten Zusammenarbeit sowie die weltweit erste dynamische Kalibrierung von Drehmomentaufnehmern.

_ Elektrische Energie- und Hochspannungs-Messtechnik

Das Aufgabengebiet der elektrischen Energie- und Hochspannungsmesstechnik gehört zu den traditionsreichsten Arbeitsbereichen in der PTB. Die gesetzlich übertragenen Aufgaben der Konformitätsbewertung, der Darstellung und Weitergabe von Einheiten sowie der Gremienarbeit werden engagiert und in sehr hoher Qualität ausgeführt. Die notwendige Verbindung von Ressortaufgaben und aufgabenbezogenen Forschungsinteressen gelingt in eindrucksvoller Weise. Der Arbeitsbereich überzeugt insgesamt durch große Dynamik und Motivation.

_ Quantenmetrologie und elektrisches Messwesen

Bei der Revision des SI im Jahr 2018 wird auch die elektrische Basiseinheit Ampere durch Festlegung des Wertes der Elementarladung e neu definiert. Zur Darstellung des neuen SI-Ampere, das weltweit ein primäres Stromstärkennormal benötigt, hat die PTB das Konzept der selbstreferenzierten Einzelelektronenpumpe in Halbleitern entwickelt. Damit ist eine zuverlässige Messung seltener Pumpfehler durch schnelle Einzelladungsdetektion möglich geworden. Bei dieser Leistung, die zu einem ersten intrinsisch validierten primären Stromnormal geführt hat, handelt es sich um weltweit führende Spitzenforschung. Als weitere Leuchttürme der PTB-Forschung erweisen sich die Josephson-basierten Messsysteme sowie der Wechselstrom-Quanten-Hall-Effekt (QHE) und die daraus folgende Rückführung der Kapazitätseinheit. |⁷⁹ Auch auf diesen Gebieten ist die PTB weltweit führend. Das angestrebte Ziel, den Betrieb des Quanten-Kapazitätsnormals in Kalibrierlaboratorien und Industrie einzuführen, erscheint realistisch. Sehr positiv zu bewerten ist die hervorragende nationale und internationale Vernetzung dieses Bereichs mit Wissenschaft und Wirtschaft.

_ Antennen- und On-Site-Feldmesstechnik

Die Leistungen in diesem Arbeitsbereich werden insgesamt als sehr gut bewertet. Die Entwicklung von Vor-Ort-Antennenmesstechnik auf Basis von *Unmanned Aerial Systems* bzw. Drohnen erlaubt eine weltweit einzigartige Messung und Charakterisierung von elektromagnetischen Feldern an nahezu beliebigen Raumpunkten. Diese wird beispielsweise zur Klärung der Rückwirkung von Windkraftanlagen auf Funkanlagen der Flugführung und des Wetterradars dringend benötigt. Ferner wird der messtechnisch verfügbare Frequenzbereich bis in den Terahertz-Bereich für zukünftige Anwendungen in der Antennen-

|⁷⁹ In diesem Zusammenhang sind kürzlich Graphen AC-QHE-Proben eingesetzt worden, die GalliumArsenid-Proben im AC Bereich (Wechselspannung) hinsichtlich der Entwicklung eines Quanten-Impedanz-Standards noch übertreffen.

messtechnik kontinuierlich erweitert. Nachvollziehbar und überzeugend ist zudem der geplante Aufbau eines neuen Forschungsgebietes zur Vermessung planarer Wellenleiter.

_ Millimeterwellen- und Terahertz-Messtechnik

Die Forschungsschwerpunkte in diesem Arbeitsbereich werden auf einem sehr hohen wissenschaftlichen Niveau bearbeitet. Mit einem FuE-Anteil von ca. 60 % ist der Bereich sehr forschungsstark und zeichnet sich durch eine enge Vernetzung mit herausragenden universitären und außeruniversitären Partnern aus. Positiv zu bewerten sind darüber hinaus die regelmäßigen Metrologiegespräche mit Partnern aus der Industrie zur Ermittlung zukünftiger Forschungsbedarfe.

Der Arbeitsbereich erschließt neue Messmöglichkeiten durch laserbasierte Femtosekunden-Messtechnik. Der hier entwickelte Spannungsimpulsstandard zur Erzeugung ultrakurzer elektrischer Pulse ist weltweit einzigartig und führt die Kalibrierpyramide zur Weitergabe ultraschneller Pulsparameter an.

Intensive Forschungs- und Entwicklungsarbeiten führt die PTB ebenfalls auf den Gebieten Frequenzpräzisionsmessungen (100 GHz bis 10 THz) und Antennencharakterisierung (Amplitude und Phase räumlich aufgelöst) durch. Sie betreibt das größte Referenz-Freifeld in Europa zur Vermessung von Antennen. Für den Ausbau der Hochfrequenz-Leistungsmesstechnik bis 325 GHz entwickelt die PTB Transferstandards mit der Industrie und bietet den einzigen weltweit kommerziell erhältlichen Transferstandard bis 110 GHz an. Im Rahmen der Erweiterung der optischen Technologien in den sub-THz-Bereich ist die PTB hinsichtlich der absoluten Messung der Strahlungsleistung im THz-Spektralgebiet weltweit führend. Ihre herausragenden Leistungen auf diesem Themengebiet gründen auf einer schlüssigen und international sichtbaren Forschungsstrategie.

_ Sensorik für die Messung kleiner magnetischer Felder

In diesem sehr dynamischen Arbeitsbereich befasst sich die PTB mit der Entwicklung Supraleitender Quanten-Interferometer (SQUIDs), u. a. zur Messung sehr kleiner Magnetfelder und elektrischer Ströme für neue Methoden der medizinischen Diagnostik. Die PTB verfügt mit insgesamt vier magnetisch abgeschirmten Kabinen und hochempfindlichen SQUID-Systemen über eine weltweit einzigartige Infrastruktur auf diesem Gebiet. In der medizinischen Diagnostik liegt der Forschungsschwerpunkt auf der Messung der Magnetfelder der Hirnaktivität (Magnetenzephalographie, MEG), der Charakterisierung und quantitativen Bildgebung von magnetischen Nanopartikeln, die in Diagnostik oder Therapie als Sonden eingesetzt werden, sowie der Magnetresonanzbildgebung (MRI) im Mikrotreslabereich. Die ausgezeichnete Infrastruktur und das große wissenschaftliche Engagement führen zu international sichtbarer Spitzenforschung.

Die Bearbeitung dieser Aufgaben erfolgt zum Teil in interdisziplinärer Zusammenarbeit mit zahlreichen wissenschaftlichen und industriellen Partnern, meist in Form von Verbundvorhaben. Erwähnenswert ist die große Nachfrage der SQUID-Messtechnik bei zahlreichen namhaften Nutzerinnen und Nutzern (Charité Berlin, Nationale Metrologieinstitute (NMI), NIST u. v. a.).

Themenbereich 4 „Ionisierende Strahlung“

_ Ionisierende Strahlung in der Medizin

Mit der Bereitstellung von Basisdaten für die Dosimetrie und die Aktivitätsmessung, der Untersuchung von physikalischen und biologischen Strahlenwirkungen in Biomolekülen und Zellen, der Entwicklung und Charakterisierung von Detektoren für physikalische und biologische Strahlenwirkungen ist die Grundlagenforschung der PTB in diesem Bereich von außerordentlich hoher Relevanz für die Medizin. Die forschungsprogrammatische Ausrichtung ist konsistent und zukunftsorientiert. Durch Drittmittelprojekte und Kooperationen sind die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten national und international sehr gut vernetzt. Aus Sicht der PTB stellt sich jedoch zunehmend die Schwierigkeit, geeignete wissenschaftliche Nachwuchskräfte, vor allem leistungsstarke Postdocs, zu gewinnen bzw. zu halten. Sie steht vor allem mit Kliniken im Wettbewerb um gut ausgebildete Medizinphysikexperten.

Um die Ergebnisse der Forschung in die Praxis zu transferieren, bearbeitet der Bereich etwa 55 nationale und internationale Normen |⁸⁰, davon über ein Viertel federführend. Primär profitieren hiervon die Medizinphysik und die Wirtschaft. Darüber hinaus sind für dieses Themengebiet PTB-Vertreterinnen und Vertreter in rund 100 internationalen und nationalen Gremien |⁸¹ engagiert.

Die Abgrenzung der Aufgaben von PTB und BfS in diesem Bereich ist klar und zielführend geregelt. Die Zusammenarbeit und Abstimmung der beiden Ressortforschungseinrichtungen funktioniert offenkundig sehr gut.

_ Ionisierende Strahlung in der Umwelt

Im Mittelpunkt der Umweltanalytik steht die Weiterentwicklung, Rückführung und Qualitätssicherung von Referenzmaterialien, Analyse- und Messverfahren. Dabei stellt sich insbesondere das Problem der chemischen Auftren-

|⁸⁰ DIN - Deutsches Institut für Normung, ISO - *International Organization for Standardization*, IEC - *International Electrotechnical Commission*, CENELEC - *European Committee for Electrotechnical Standardization*, CEN - *Comité Européen de Normalisation*.

|⁸¹ Unter anderem in EURAMET - *European Association of National Metrology Institutes*, COOMET - *Euro-Asian Cooperation of National Metrological Institutions*, ICRU - *International Commission on Radiation Units and Measurements*, ICRM - *Institute of Certified Records Managers*, EURADOS - *European Radiation Dosimetry Group*, DGMP - *Deutsche Gesellschaft für Medizinische Physik*, DGN - *Deutsche Gesellschaft für Neurologie* etc.

nung der Substanzen. Für eine verbesserte Risikoanalyse wird empfohlen, die Isotopentrennung in der Analyse (stärker) zu berücksichtigen.

Als Folge des kerntechnischen Unfalls in Tschernobyl wurde in Deutschland das „Integrierte Mess- und Informationssystem“ (IMIS) zum flächendeckenden Monitoring der Umweltradioaktivität entwickelt, an dem auch die PTB beteiligt ist. Daneben führt die PTB auch auf europäischer Ebene inhaltlich und methodisch überzeugende Projekte zur Messung radioaktiver Strahlung durch. Sie betreibt damit grundlegende Arbeiten und anwendungsorientierte Forschung auf sehr hohem Niveau, die so im Wissenschaftssystem nicht abgebildet sind.

Themenbereich 5 „Länge, dimensionelle Metrologie“

_ Erneuerbare Energien

Im Rahmen ihrer gesetzlichen Beauftragung führt die PTB Dienstleistungen für die metrologische Rückführung im Bereich erneuerbare Energien durch. Rund die Hälfte aller weltweit verkauften Solarmodule ist über deutsche Kalibrierlaboratorien auf Messungen in der PTB rückgeführt. Die Arbeiten zu erneuerbaren Energien sind insgesamt strategisch sehr klug aufgestellt mit überzeugenden Leistungen auf dem Gebiet der Solarzellen sowie der Messung großer Drehmomente (Windenergie). Positiv ist auch die ausgeprägte Nachfrageorientierung der PTB in diesem Bereich. Um den Bedarf an Kalibrierungen für den zuverlässigen Betrieb von Windenergieanlagen zu decken, errichtet die PTB eine derzeit weltweit einzigartige messtechnische Infrastruktur mit einem Investitionsvolumen von 15 Mio. Euro |⁸². Dieses Vorhaben wird ausdrücklich unterstützt.

_ Fertigungsmesstechnik

Die Fertigungsmesstechnik gehört zu den Kernaufgaben der PTB, die in diesem Bereich seit Jahren Metrologie auf höchstem Niveau betreibt. Leuchtturmprojekt ist das Avogadro-Projekt zur Neudefinition der Masse, in dem die PTB weltweit eine führende Rolle einnimmt. Auf unterschiedlichen Skalen werden Methoden zur präzisen Vermessung dreidimensionaler Strukturen entwickelt, hierbei werden vor allem berührungslose Verfahren eingesetzt. Die PTB befasst sich nicht nur mit der stetigen Verbesserung vorhandener Normale, sondern greift auch neue relevante Verfahren wie etwa die Computertomographie (CT) auf. Die Anwendung der CT in der Koordinatenmesstechnik zur Kompletterfassung der Geometrie von Werkstücken, mit der innere und äußere Geometrien in hoher Auflösung gemessen werden können, ist neuartig. Allerdings sind die Messeigenschaften der CT als komplexe 3D-Messtechnik bisher meist nicht ge-

|⁸² Von den 15 Mio. Euro stammen 9,5 Mio. Euro vom BMWi und 5,5 Mio. Euro aus dem Haushalt der PTB.

nau genug. Für eine Reihe von Messaufgaben gibt es überdies noch Anwendungseinschränkungen. Bei der Kalibrierung beispielsweise von großen Komponenten wie Windturbinen ermöglicht die CT es bereits grundsätzlich, eine 3D-Struktur mittels mathematischer Berechnung zu rekonstruieren. Dies erfordert eine Standardisierung der mathematischen Berechnung. Empfohlen wird jenseits der 1D-Längenmessung eine systematische Auseinandersetzung mit 2D-/3D-Geometrien und den dort erzielbaren Genauigkeiten im Rahmen des Themenfelds Mathematik in der Metrologie (siehe unten). Andere Aktivitäten in der Fertigungsmesstechnik, wie z. B. die Rauheitsmessung, thermische Ausdehnung und Härte, sind sehr konventionell angelegt; für diese sollte künftig verstärkt auf eine Weiterentwicklung auf dem neuesten wissenschaftlichen Stand geachtet werden.

Von großer Bedeutung ist die interdisziplinäre Zusammenarbeit von Messtechnik, Fertigung und mathematischer Modellierung. Die Aktivitäten der PTB in der Fertigungsmesstechnik tragen wesentlich zum Erfolg deutscher Unternehmen am Weltmarkt bei. Dabei werden sowohl Unternehmen in unterschiedlichen Bereichen des Maschinenbaus erreicht als auch die optische Industrie.

_ Formmessung optischer Funktionsflächen

Bei den Forschungsarbeiten liegt der Schwerpunkt auf dem Nachweis und der Verbesserung der Messgenauigkeit in der Fertigung. Mit seiner klar formulierten Zielstellung ist der Bereich sehr zukunftsorientiert. Die Aufgaben reichen von der Vermessung von Planflächen, Kugelflächen bis zu Asphären und Freiformflächen. Es werden optische Verfahren genutzt, die den Charakteristika der Oberflächen sehr gut angepasst und methodisch *State of the Art* sind. Dass die PTB im engen Austausch mit anderen Instituten, die alternative taktile Messverfahren einsetzen, die unterschiedlichen Messtechniken analysiert und vergleicht, ist begrüßenswert.

Themenbereich 6 „Masse und abgeleitete Größen“

_ Neudefinition von kg und mol

Die Neudefinition der Masseneinheiten wird durch die experimentellen Arbeiten in diesem Arbeitsbereich vorbereitet. Die Arbeiten konzentrieren sich auf präzise vermessene Silicium-Kugeln. Das übergeordnete Ziel ist die (mit allen Metrologie-Laboratorien weltweit) geplante Rückführung aller SI-Einheiten auf Naturkonstanten voraussichtlich ab 2018. Dieses Projekt verfolgt die PTB schon über ein Jahrzehnt mit hoher Kontinuität. An anderen Metrologie-Labors (z. B. NIST) verfolgte alternative Ansätze sind durch Kooperationen eingebunden. Die konkreten PTB-Arbeiten an der Neudefinition der Masseneinheiten nehmen international eine führende und für die Neudefinition des SI-Systems zentrale Rolle ein. Wünschenswert wäre, diese Arbeiten auch durch die Einbindung

jüngerer Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler in das Team für die Zukunft zu sichern.

_ Vakuum- und Druckmetrologie

Die Vakuum- und Druckmetrologie der PTB überspannt lückenlos den Bereich von 10^{-9} Pascal bis 10^{+9} Pascal (Pa) mit Primärnormalen zur Darstellung und Weitergabe des Drucks. Damit deckt sie weltweit den größten Bereich der Druckmessung auf dem neuesten Stand der Wissenschaft ab. Der Bereich beteiligt sich international an der kontinuierlichen Weiterentwicklung der höchstgenauen Druckmesstechnik. Da die Gasdichte auch mit optischen Verfahren sehr gut gemessen werden kann, testet die PTB derzeit im Rahmen eines Forschungsprojekts ein Verfahren zur Druckmessung im Grobvakuum, das daneben nur am NIST verwendet wird. Bei diesem Verfahren wird die Gasdichte über eine Brechzahlmessung mittels optischer Resonatoren bestimmt.

Der Druck ist eine der meistgemessenen physikalischen Größen und in vielen Bereichen der Industrie ein wichtiger Prozessparameter. Daher ist dieses Themengebiet von großer Bedeutung für die industrielle Anwendung.

Themenbereich 7 „Metrologie in der Chemie und Stoffeigenschaften“

_ Metrologie für den Schutz der Atmosphäre

In der Metrologie für den Schutz von Atmosphäre und Klima konzentriert sich die PTB auf gasanalytische optische Verfahren sowie auf Aerosolforschung zur Entwicklung von Methoden und einer Infrastruktur für die Rückführung. Die gasanalytischen optischen Primär-/Transferverfahren sind bereits sehr weit fortgeschritten, während für Aerosole derzeit kein rückführbares Verfahren existiert und hier die Standardisierungsbedingungen entsprechend ungünstig sind. Die Rückführung von Emissionsgrenzwerten für (Ruß)Aerosolgrößen wird jedoch vor allem seitens der Automobilindustrie stark nachgefragt. Die PTB kommt dem aktuellen Bedarf mit der Herstellung von künstlichen Referenzaerosolen nach und demonstriert damit ein weiteres Mal ihre stark ausgeprägte Kundenorientierung. Positiv hervorzuheben ist zudem die gelungene Einbeziehung des wissenschaftlichen Nachwuchses in die Arbeiten dieses Bereichs sowie das überzeugende Engagement der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter insgesamt. Erwähnenswert ist auch das hohe Niveau der technischen Ausstattung.

_ Metrologie fluider Energieträger

In diesem Arbeitsbereich werden Dichte-/Viskositätsmessungen über weite Temperatur- und Druckbereiche in Referenzqualität großenteils mit kommerziell erhältlichen Geräten erbracht. Der Schwerpunkt der Arbeiten liegt auf der Charakterisierung fluider Energieträger. Stoffgrößen werden bisher überwiegend experimentell ermittelt und publiziert; künftig sollte die PTB hier ver-

stärkt auch Modellierung betreiben. Auf dem Gebiet der molekularen Simulation zur Vorhersage von Stoffgrößen sind in den letzten Jahren weltweit durch verbesserte Modelle für zwischenmolekulare Kräfte vor allem in universitären Arbeitsgruppen erhebliche Fortschritte erzielt worden. Es ist zu erwarten, dass mit zunehmend schnelleren Rechnern künftig Stoffwerte von Referenzqualität auch durch molekulare Simulationen gewonnen werden können. Die PTB sollte die Erweiterung der Metrologie fluider Energieträger um dieses Arbeitsgebiet prüfen.

Die Einrichtung eines neuen Kompetenzzentrums für die Reaktionskinetik bei der Verbrennung von Energieträgern ist grundsätzlich begrüßenswert. Damit verbindet die PTB das Ziel, ein metrologisches Verständnis für die Reaktionskinetik zu entwickeln. Da das Zentrum sich erst im Aufbau befindet, ist eine Bewertung zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht sinnvoll möglich.

Themenbereich 8 „Metrologie in der Medizin“

_ Metrologie für die Biochemie und Biomedizin

Zu den zentralen Aufgaben dieses Bereichs zählen die Darstellung, Bewahrung und Weitergabe von nationalen Normalen für prioritäre Messgrößen der Laboratoriumsmedizin sowie die Entwicklung neuer Messgrößen für die klinische Diagnostik, die insgesamt auf sehr hohem Niveau durchgeführt werden. Da Bluttests derzeit noch mit einer Fehlerquote von 10 bis 20 Prozent behaftet sind, besteht in der Biomedizin dringender Bedarf an einer höheren Messgenauigkeit. Vor allem mangelt es an zuverlässigen Messverfahren im Bereich von Proteinen, Zellen und DNA. Derzeit konzentriert sich die PTB auf die nationale Umsetzung der EU-Richtlinie für In-vitro-Diagnostika und der „Richtlinie der Bundesärztekammer zur Qualitätssicherung laboratoriumsmedizinischer Untersuchungen“ für eine nationale und internationale Vergleichbarkeit von Messergebnissen klinischer Marker. Hervorzuheben ist der hohe Stellenwert, der in diesem Bereich der Betreuung von Doktorandinnen und Doktoranden eingeräumt wird, die überwiegend im Rahmen von Kooperationen angeworben wurden.

_ Quantitative Messverfahren für die Medizin

Obwohl quantitative Messverfahren in der Diagnostik und in der Therapiekontrolle breit eingesetzt werden, ist deren Genauigkeit, Vergleichbarkeit und Reproduzierbarkeit oft unzureichend beschrieben. Insofern kommt diesem Themengebiet für die Charakterisierung der Messergebnisse eine hohe Relevanz zu. In der medizinischen Bildgebung entwickelt die PTB neue quantitative Verfahren, um biophysikalische Größen zu messen. Zur Vergleichbarkeit der Messergebnisse oder Bilddaten in multizentrischen Studien werden physikalische Standards entwickelt, um etwaige systematische Unterschiede zwischen Standorten, Gerätetypen und Herstellern zu ermitteln. Von großer Relevanz

für die Gewährleistung der Patientensicherheit ist die Messung der Röntgendosis bei der Bildgebung mit ionisierender Strahlung. Als Verfahren zur Bestimmung und Rückführung der Dosis werden CT, PET und MRT eingesetzt. Der Arbeitsbereich ist wissenschaftlich sehr aktiv und leistet zum Teil sehr anspruchsvolle Forschung auf einem hochrelevanten Gebiet. Die instrumentelle Ausstattung ist hervorragend. Mit großem Engagement und hohem Aufwand hat die Arbeitsgruppe ein MRT-Spitzengerät aufgebaut.

Themenbereich 9 „Photometrie und Radiometrie“

In diesem Themenfeld werden Kalibrierdienstleistungen sowie Forschung und Entwicklung im Bereich der Lichtstärke durchgeführt. Beispielweise geht es um die Charakterisierung des Farb- und Reflexionsverhaltens komplexer Oberflächen. Die visuelle Erscheinung ist von hoher Marktrelevanz, etwa bei Autos, Druckerzeugnissen und Konsumgütern. Vor diesem Hintergrund ist der Bereich sehr kunden- und nachfrageorientiert. Im Rahmen der Messungen fallen immense Mengen mehrdimensionaler Daten an, für die aber unklar ist, welche verarbeitbaren Informationen daraus abgeleitet werden können. Wünschenswert wäre eine Intensivierung der Forschungsanstrengungen hinsichtlich der Datenauswertung und -nutzung.

In der Kalibrierung von Strahlungsquellen und Photodetektoren ist die PTB weltweit führend. Forschung und Entwicklung machen etwa 50 % der Arbeiten in der *Metrology Light Source* (MLS) aus, die andere Hälfte befasst sich mit Messtechnik für die Industrie und Kalibrierung im UV- bis Röntgenbereich als Dienstleistungen. Die Vernetzungen und Kooperationen mit der Halbleiterindustrie und außeruniversitären Forschungseinrichtungen, vor allem Helmholtz-, Max-Planck- und Fraunhofer-Instituten, sind hervorragend. Als ein Leuchtturm für industrielle Anwendungen in der Halbleitertechnologie werden in der EUV-Reflektometrie Spiegel von 70 cm Durchmesser vermessen. In der Elektronenspektroskopie mittels Photonenenergien von 10 bis 100eV werden in Zusammenarbeit mit der Universität Graz und dem Forschungszentrum Jülich, Molekülorbitale durch energieabhängige Photoemissions-Tomographie abgebildet, was ein Glanzlicht der Forschungsarbeiten an der PTB darstellt.

Großes Forschungspotenzial wird den Arbeiten der Radiometrie mit Photonen beigemessen. Begrüßenswert wäre eine Stärkung der Vorlaufforschung auf diesem Gebiet in der PTB. Hervorzuheben sind auch die sehr guten Leistungen des wissenschaftlichen Nachwuchses.

Die PTB betreibt auf dem Gebiet der „Thermometrie für die Industrie“ Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zu verbesserten Temperaturnormalen, Messverfahren und praktisch handhabbaren Thermometern. Zusammen mit NIST befindet sich das PTB-Labor für die Thermometerkalibrierung |⁸³ auf höchstem metrologischem Niveau. Aktuell befasst sich dieser Themenbereich insbesondere mit der Entwicklung von Thermoelementen und Hochtemperatur-Fixpunktzellen auf Basis von Metall-Kohlenstoffverbindungen für Temperaturbereiche, in denen bisher nur mit Strahlungsthermometern gemessen werden kann.

Die PTB ist eines von wenigen NMI, die sich mit Strahlungsthermometrie beschäftigen. Mittelständische deutsche Hersteller von industriellen Strahlungsthermometern sind auch deshalb Weltmarktführer, weil die PTB die Rückführbarkeit auf die internationale Temperaturskala ITS-90 gewährleistet. Für die anwendungsspezifische Rückführung auf die internationale Temperaturskala betreibt sie u. a. einen weltweit einmaligen Versuchsstand zur Strahlungsthermometrie und Infrarotradiometrie unter Vakuum. Anwendungsbereiche sind beispielsweise Wetterbeobachtung, Klimaforschung und Erdfernerkundung.

Ferner wirkt die PTB bei der Neudefinition des Kelvins, die auf neuen Messungen der Boltzmann-Konstanten an mehreren NMI weltweit basieren wird, führend mit. Zur Neubestimmung der Boltzmann-Konstanten hat sie aufgrund eigener Vorarbeiten als einziges NMI das Verfahren der dielektrischen Gasthermometrie gewählt. |⁸⁴ Für dieses Projekt hat sie eine sehr aufwändige einzigartige Apparatur aufgebaut. |⁸⁵ Bisher ist die angestrebte Unsicherheit für die Boltzmann-Konstante von 2 ppm noch nicht ganz erreicht worden. Der Forschungsbereich ist jedoch zuversichtlich, dieses Ziel in Kürze zu erreichen. Das Messverfahren wird künftig weiter genutzt, um die dielektrischen und thermischen Eigenschaften von binären Gasgemischen und Wasserstoffgemischen zu bestimmen.

Insgesamt handelt es sich bei der Thermometrie um einen sehr forschungsstarken Bereich mit international anerkannter Spitzenforschung. Diese zeichnet sich durch eine hervorragende Vernetzung mit anderen NMI aus, beispielsweise im Rahmen internationaler Vergleichsmessungen und der Weitergabe der Temperaturskalen. Die wissenschaftliche Publikationstätigkeit

| ⁸³ Weitergabe der internationalen Temperaturskalen ITS-90 und PLTS-2000.

| ⁸⁴ Unsicherheit der Bestimmung der Dielektrizitätskonstanten: $1 \cdot 10^{-9}$.

| ⁸⁵ Unter anderem wurde für die Druckmessung zusammen mit einem Industriepartner ein Kolbenmanometer mit einem Messbereich bis 7 MPa und einer Messunsicherheit von 1 ppm entwickelt.

ist hier allerdings nur von nachrangiger Bedeutung und sollte angesichts der hochwertigen Forschungsleistungen künftig verstärkt werden. Erwähnenswert sind die intensiven Kooperationen mit deutschen Herstellern von Thermometern, Unternehmen in der Energiewirtschaft, Anwendern in der Messtechnik, Sensorentwicklung, industriellen Prozesssteuerung und Sicherheitstechnik sowie universitären und außeruniversitären Forschungsinstituten für die Erdfernerkundung und Klimaforschung. Sehr beeindruckend ist das große Engagement der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, mit dem die zahlreichen Aufgaben und Anforderungen bewältigt werden. Dies gilt auch für die hier geleistete aufwändige Gremienarbeit, in vielen Fällen in leitender Funktion.

Themenbereich 11 „Zeit und Frequenz“

Dieser Themenbereich betreut die Verteilung von Zeitmarken für vielfältige wichtige Anwendungen als Dienstleistung. Zugleich wird in Forschungsprojekten die zukünftige Strategie für das nationale und europäische Zeitmanagement vorbereitet. Hervorzuheben sind die Arbeiten zu einem europaweiten Netzwerk der Frequenzverteilung auf Glasfaserbasis. Es werden weitere wissenschaftlich attraktive und aktuelle Themen verfolgt (z. B. quantenverstärkte Sensoren für Zeitnormale, eine nukleare Thorium-Uhr, Untersuchungen zur Konstanz der Naturkonstanten), die diese Abteilung der PTB eng sowohl mit anderen Metrologie-Laboratorien als auch mit führenden Forschungsinstituten weltweit vernetzen.

Die PTB nimmt mit ihrem Themenbereich „Zeit und Frequenz“ in führender Position (zusammen mit den USA und Japan) am weltweiten Wettbewerb zur Verbesserung von Uhrennormalen teil. Die Abteilung hat aufgrund ihrer exzellenten wissenschaftlichen Leistungen das hohe internationale Renommee der PTB in diesem Bereich begründet. Die bereits eingeleitete Verjüngung des Teams verspricht eine sehr gute Ausgangsposition für die kommenden Jahre. Mit Sorge wird allerdings der hohe Drittmittelanteil der Abteilung gesehen. Der personelle Aufwuchs in den letzten Jahren wurde allein über Drittmittel bewerkstelligt. Die ausgeprägte Drittmittelabhängigkeit bringt die Abteilung an ihre Leistungsgrenzen. Daher wird dringend empfohlen, diese Entwicklung zu überdenken.

Themenbereich 12 „Mathematik und metrologische Informationstechnik“

Nachdrücklich begrüßt wird die Einrichtung des Themenbereichs „Mathematik und metrologische Informationstechnik“ in der PTB, die auf die Empfehlungen des Wissenschaftsrates 2008 zurückgeht. Im Vordergrund der Arbeiten stehen zum einen die numerische und analytische Modellierung physikalischer Prozesse in der Metrologie. Zum anderen geht es um die Entwicklung von Verfahren der statistischen Datenanalyse, beispielsweise für die Bestimmung von Messunsicherheiten, Meta-Analysen sowie Bayessche Verfahren zur Behand-

lung inverser Probleme und Regressionsaufgaben. In einigen der hier bearbeiteten Themen erbringt der Bereich wissenschaftliche Spitzenleistungen; dies gilt etwa für die Modellierung der Fluidodynamik, die Ausbildung kollektiver Moden und Cluster-Formation für das Strömungsverhalten von Bakterien. Es ist der PTB gelungen, ein dynamisches Team zu etablieren, das seine große Leistungsfähigkeit mit zahlreichen Publikationen, vor allem zur Modellierung, in hochrangigen internationalen Journalen und mit umfangreichen Drittmittelleinwerbungen bereits unter Beweis gestellt hat. Das Know-how für eine Modellierung, die mit dem Ziel einer breiteren bzw. generelleren Anwendung auf spezifische (auch inverse) Probleme wie die bereits erwähnte Simulation von 2D-/3D-Strukturen im Bereich der Fertigungsmesstechnik angewandt werden kann, ist vorhanden. Es wird empfohlen, die Anwendung zusammen mit Drittmittelpartnern weiter zu stärken. Allerdings reichen die bestehenden personellen Ressourcen |⁸⁶ nicht aus, um alle Anfragen innerhalb der PTB bearbeiten zu können. Eine Aufstockung der grundfinanzierten Stellen in diesem Bereich wird daher dringend angeraten.

_ Metrologische IT

Dieser Arbeitsbereich weist die Schwerpunkte Zeitsynchronisation, gesetzliches Messwesen, Simulation und Softwarevalidierung sowie Normung aus. Positiv gewürdigt wird, dass die PTB Arbeiten zur Messsicherheit, Messbeständigkeit und Prüfbarkeit innovativer Produkte in ihr Aufgabenportfolio aufgenommen hat. Die Mitwirkung in internationalen Standardisierungsgremien und -konferenzen zusammen mit der Wirtschaft ist wichtig. Aufgrund der sehr dynamischen Entwicklung im Bereich Industrie 4.0 reichen die Aktivitäten allerdings bei weitem nicht aus. Die strategische Ausrichtung der metrologischen IT in der PTB ist nicht ausreichend geklärt. Es wird nachdrücklich empfohlen, diesem Themenfeld innerhalb der PTB und seitens des zuständigen Ressorts einen zentralen Stellenwert einzuräumen und das Aufgabenprofil anzupassen und zu schärfen, um die internationale Wettbewerbsfähigkeit Deutschlands langfristig zu sichern (vgl. B.II.1.a).

Der systematische Umgang mit Datenstrukturen und Daten bestimmter Anwendungsfelder ist in der PTB noch nicht stark ausgeprägt. International gewinnt diese Entwicklung aber zunehmend an Bedeutung. Vorreiter ist das US-amerikanische NIST |⁸⁷, das in jüngerer Zeit gezielt den Stellenwert von neuen Anwendungsfeldern durch die Digitalisierung im Rahmen eines großen Investitionsprogramms deutlich ausbaut. Auf diesem Gebiet sollte die PTB ihre Anstrengungen künftig intensivieren.

| ⁸⁶ Insgesamt 27 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, davon 15 drittmittelfinanziert.

| ⁸⁷ NIST - *National Institute of Standards and Technology*.

Physikalische Sicherheitstechnik und Metrologie im Explosionsschutz sind für die PTB eher ungewöhnliche Themen, die aus historischen Gründen hier angesiedelt sind. Von der PTB werden nur explosionsfähige Gase bzw. Gasgemische untersucht. Explosivstoffe hingegen liegen in der Zuständigkeit der BAM. Zu den Aufgaben des Themenbereichs zählt die Bewertung von Geräten, die in Umgebungen mit explosiven Gemischen betrieben werden. Ermittelte Kenngrößen für den Explosionsschutz fließen in die Datenbank CHEMSAFE |⁸⁸ ein, ein Gemeinschaftsprojekt von DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie, BAM und PTB. Angesichts der vorhandenen personellen und messtechnischen Ausstattung sind Anzahl und Qualität der durchgeführten Verfahren eindrucksvoll. Neue Forschungs- und Entwicklungsthemen werden vor allem aus der Industrie heraus generiert, aufgabenbezogene Grundlagenforschung darüber hinaus aber auch auf eigene Initiative betrieben. Die Abteilung sollte künftig verstärkt Modellierung und numerische Simulation einsetzen und damit schon begonnene Arbeiten konsequent fortführen. Positive Weichen für die Zukunft sind zudem durch die engagierte Einbeziehung und Förderung von wissenschaftlichen Nachwuchskräften gestellt.

Hervorzuheben ist die sehr gute Vernetzung des Bereichs mit Universitäten und Industrie sowie darüber hinaus mit dem Bund, der EU und der UN, bei denen die Regelungskompetenz für diesen Bereich liegt. An der gemeinsamen Schnittstelle „Metrologie in der Chemie“ funktionieren Aufgabenteilung und Abstimmung zwischen PTB und BAM hervorragend. Die PTB konzentriert sich auf die wirkliche Rückführung, zum Thema Explosionsschutz findet regelmäßig ein gemeinsamer Workshop zur Abstimmung der Ziele statt. Das jährliche Präsidentengespräch mit der BAM vervollständigt die vorbildliche Abstimmungspraxis.

Themenbereich 14 „Nanometrologie“

Die Aufgaben dieses Bereichs umfassen u. a. die Bestimmung der Größe und Größenverteilungen von nanoskaligen Referenzpartikeln. Dabei werden auch magnetische Nanopartikel für Anwendungen im medizinischen Bereich untersucht. Es werden sowohl integrale Messmethoden als auch mikroskopische Messmethoden eingesetzt. Weiterhin wird Metrologie an Nanostrukturen und nanostrukturierten Messobjekten mit Scatterometrie und Mikroskopie betrieben. Dabei kommen auch auf physikalische Modelle gestützte Simulationen der Signalkontraste erfolgreich zum Einsatz. Der Bereich ist sehr gut vernetzt mit deutschen Universitäten (insbesondere TU Braunschweig und Universität

|⁸⁸ Die numerische Datenbank CHEMSAFE enthält bewertete sicherheitstechnische Kenngrößen für den Brand- und Explosionsschutz von brennbaren Gasen, Flüssigkeiten und Stäuben.

Hannover im Rahmen des *Laboratory for Emerging Nanometrology* LENA |⁸⁹), Forschungsorganisationen sowie zahlreichen Industrieunternehmen und Metrologie-Organisationen. Die Verfahren und Ergebnisse zeugen von hoher fachlicher Kompetenz. Sehr wünschenswert wäre jedoch, die Palette der mikroskopischen Untersuchungen auf der Nano- und Sub-Nanoskala durch neuere Rastersondenmethoden zu erweitern. Um international konkurrenzfähig zu bleiben, besonders auch im Hinblick auf NIST, sollten hier Tieftemperatur-STM/AFM (mit Q-plus-Sensor, der auch Kraftmessungen ermöglicht), STM induzierte Lumineszenz, *Tip-enhanced Raman-Spectroscopy* (TERS |⁹⁰), und STM für magnetische Messungen an Nanopartikeln in naher Zukunft zum Einsatz kommen.

_ Metrologie mit Synchrotronstrahlung I (MLS) bzw. Synchrotronstrahlung II (BESSY II)

In der Nanometrologie werden Schichtdicken dünner Filme und Nanoteilchen von 1 nm bis 100 nm im Photonenenergiebereich von 1,75 bis 10 keV untersucht. Als hervorragend bewertet wird, dass die Schichtdicke eines 100 nm dünnen Films dabei mittels Röntgenreflektometrie mit einer Genauigkeit von 1 nm vermessen wird. Ebenso liefert der Messplatz Röntgenspektrometrie exzellente Resultate in der Röntgenfluoreszenz mit Linienbreiten unter 1 eV. Ferner wird am ESA-Strahlrohr für die Röntgenastronomie eine neuartige Silizium-Poren-Optik getestet und vermessen, die einem Spiegel von 800 Quadratmeter entspricht. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die PTB in ihrem Labor an BESSY II Forschung, Entwicklung und Technologietransfer auf höchstem internationalem Niveau betreibt. Besonders zu erwähnen ist zudem der hohe Stellenwert der wissenschaftlichen Nachwuchsförderung.

II.1.c Publikationen und Drittmittel

Dem breit gefächerten Aufgabenportfolio entsprechend verfügt die PTB über unterschiedliche Publikationsformate; neben wissenschaftlichen Beiträgen werden beispielsweise Regelwerke, Prüf- und Analyseberichte, Zertifizierungen etc. erarbeitet, die sich an unterschiedliche nationale und internationale Zielgruppen richten. Für diese erforderliche Bandbreite sollte die PTB eine missionsadäquate und adressatengerechte Publikationsstrategie entwickeln, mit der die unterschiedlichen Veröffentlichungsbedarfe systematisch bestimmt werden. Die wissenschaftliche Publikationstätigkeit der PTB wird insgesamt als gut bis sehr gut bewertet, in einigen Bereichen kann die Bundesanstalt auch Spit-

|⁸⁹ Das Forschungszentrum für Nanomesstechnik, das „*Laboratory for Emerging Nanometrology*“ (LENA), wird auf dem Campus der TU Braunschweig errichtet. Bund und Land Niedersachsen finanzieren das Zentrum im Rahmen der gemeinsamen Initiative „Forschungsneubauten“. Die PTB ist als strategischer Partner an LENA beteiligt.

|⁹⁰ siehe R. Zhang et al., *Nature* 498, 82 (2013).

zenpublikationen vorweisen. Seit der zurückliegenden Evaluation des Wissenschaftsrates ist hier eine erkennbar positive Entwicklung zu verzeichnen. Auf dieser Grundlage sollte die PTB ihre Anstrengungen im wissenschaftlichen Bereich auch weiterhin auf die Erarbeitung qualitativ hochwertiger Publikationen in referierten Zeitschriften konzentrieren. Im Rahmen der Publikationsstrategie sollten auch Veröffentlichungen in *Open Access* unterstützt und darüber hinaus eine *Open Data Policy* verfolgt werden. Dies erfordert allerdings auch die Bereitstellung entsprechender Mittel.

Für die interessierte Fachöffentlichkeit adressiert die PTB Informationen beispielsweise zum Verbraucherschutz und setzt hierbei auch geeignete moderne Medien und Informationskanäle (z. B. Filme auf *YouTube*) ein. Bedenkenswert wäre die Entwicklung einer Kommunikationsstrategie darüberhinausgehend für spezifische Adressatenkreise wie Studierende oder besonders auch den Bundestag und die Länderparlamente.

Die PTB verfügt über ein vielfältiges Portfolio von Drittmittelaktivitäten. Sehr positiv zu bewerten sind die Drittmiteleinnahmen von insgesamt rund 96 Mio. Euro im Erhebungszeitraum 2013 bis 2015, positiv hervorzuheben ist der hohe Anteil (38 %) der EU-Drittmittel. Mit Nachdruck wird die gestaltende Rolle der PTB auf europäischer Ebene gewürdigt, nur auf diese Weise lässt sich ihre missionsgetriebene Forschung überhaupt realisieren. Das Verhältnis von Grundfinanzierung und Drittmiteleinnahmen |⁹¹ wird noch als angemessen angesehen, der Drittmittelanteil sollte jedoch nicht weiter steigen. Einzelne Bereiche, beispielsweise Radiometrie und CT, richten ihre Drittmittelaktivitäten im Wesentlichen auf die Industrie und sollten künftig vermehrt auch auf Partner aus Hochschulen zugehen.

II.1.d Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses

Das Engagement der PTB zur Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses hat sich seit der zurückliegenden Evaluation sehr positiv entwickelt. Von 29 Promovierenden im Jahr 2004 und 67 im Jahr 2007 ist die Anzahl auf ca. 150 im Jahr 2016 angestiegen. Der Ausbildung und Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses widmet die PTB besondere Aufmerksamkeit. Die Doktorandinnen und Doktoranden sind eng in die wissenschaftlichen Aktivitäten der Bundesanstalt eingebunden. Ein wichtiger Eckpunkt hierfür ist das eigene Doktorandenkonzept, in dem die PTB sich auf Regelungen für eine gute Betreuungssituation insbesondere durch ein Mentorat, die Förderung der Teilnahme an Fachveranstaltungen sowie das Angebot eines Kern-Curriculums

|⁹¹ Im Haushaltsjahr 2015 verfügte die PTB über eine Grundfinanzierung in Höhe von rund 173 Mio. Euro (Soll) und über Drittmiteleinnahmen von rund 28 Mio. Euro.

verpflichtet. Zudem soll damit eine bessere Vernetzung der Promovierenden untereinander unterstützt werden.

Eine durchschnittliche Promotionsdauer von 4,5 Jahren erscheint angesichts der guten Betreuungssituation und ohne die obligatorischen Aufgaben in der Lehre besonders im Vergleich zu den Universitäten als zu hoch. Das Bestreben der PTB, die durchschnittliche Promotionsdauer auf drei Jahre zu senken, wird daher ausdrücklich unterstützt. Ebenfalls gewürdigt werden die Gleichstellungsbemühungen der PTB. Es wäre wünschenswert, wenn die Bundesanstalt die in den Blick genommenen Ziele, besonders auch im Rahmen der Nachwuchsförderung, konsequent weiter verfolgen würde.

Positiv zu vermerken ist die Mitwirkung des PTB-Arbeitsbereichs „Zeit und Frequenz“ im Graduiertenkolleg 1729 „Grundlagen und Anwendungen ultrakalter Materie“ und der Braunschweig *International Graduate School of Metrology* (B-IGSM).

Als nicht angemessen wird die unterschiedliche Vergütungspraxis von Promovierenden in der PTB je nach Fachzugehörigkeit angesehen, die mit einer systematischen Höhervergütung der ingenieurwissenschaftlichen Doktorandinnen und Doktoranden einhergeht. Diese Praxis ist zwar der allgemein üblichen „Marktlage“ geschuldet und damit auch nicht einrichtungsspezifisch. Empfohlen wird jedoch die Entwicklung neuer Ansätze, um ein „Zweiklassensystem“ unter den Promovierenden in ein- und derselben Einrichtung möglichst zu vermeiden.

II.2 Wissenschaftsbasierte Dienstleistungen, Beratungs- und Informationsleistungen

Die Bedeutung von Forschung und Methodenentwicklung für die Dienstleistungen der PTB ist außergewöhnlich hoch, die Angebote und Leistungen selbst von ausgezeichneter Qualität. In der Politikberatung kommt der PTB eine Schlüsselposition zu, beispielsweise bei der Vorbereitung neuer Themenfelder. Sehr positiv bewertet wird das proaktive Engagement der PTB bei der Sensibilisierung für zukunftsrelevante Themen (wie etwa insbesondere Digitalisierung). Künftig sollte die PTB noch stärker in den politischen Beratungs- und Planungsprozess einbezogen werden. Wichtige Themen sind neben der metrologischen IT aktuell die Nanometrologie/-technologie. Dass die PTB und weitere Ressortforschungseinrichtungen auch aus anderen Ressorts sich auf eine gemeinsame Strategie zur Nanotechnologie verständigt haben, ist ein sehr begrüßenswerter Schritt. Überdies wird angeraten, die PTB vorausschauend in die weitere Entwicklung des biotechnologischen Bereichs einzubinden, auch wenn der Bundesanstalt hier keine tragende Rolle zukommt.

Im Rahmen der technischen Zusammenarbeit unterstützt der dafür zuständige Bereich Partner in Transformations-, Schwellen- und Entwicklungsländern beim Aufbau einer Qualitätsinfrastruktur (u. a. Metrologie, Normung, Konfor-

mitätsbewertung). Durchgeführt werden technische Trainings, Ausbildungsaktivitäten regionaler Trainer und Vergleichsmessungen, ferner zählen die Erarbeitung und Veröffentlichung von Praxisleitfäden sowie die Entwicklung von Webportalen zu den Aktivitäten des Bereichs. Hierdurch werden auch deutsche Unternehmen beispielsweise bei der Erschließung neuer Märkte in den Zielländern unterstützt. Partner der Zusammenarbeit sind im Wesentlichen kleinere und mittelgroße Unternehmen sowie Regierungen und Ministerien in den Zielländern. Die Finanzierung von dafür notwendigen Geräten und Gebäuden in den Zielländern erfolgt maßgeblich durch die Weltbank. Die technische Zusammenarbeit wird von mehreren Ministerien gefördert. Besonders stark verknüpft und eingebunden ist der PTB-Bereich in die Aktivitäten des Bundesministeriums für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (BMZ). |⁹² Die Rolle der PTB als Mittlerin für unterschiedliche Akteure (KMU, Verbände, Regierungs- und Nichtregierungsorganisationen) ist sehr begrüßenswert. Dieser Bereich leistet anspruchsvolle Aufbauarbeit von sehr hoher Qualität und mit großem Engagement der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter. Ungeachtet der systematischen Einbeziehung in die langfristig angelegten und regelmäßig wiederkehrenden Aufgaben der Entwicklungsarbeit arbeitet der Bereich im Wesentlichen auf Projektbasis. Die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter sind größtenteils (ca. 90 %) aus Drittmitteln finanziert, davon über die Hälfte auf befristeten Stellen. Dieser Anteil wird als zu hoch betrachtet und ist angesichts der kontinuierlichen Aufgaben in der technischen Zusammenarbeit nur bedingt nachvollziehbar und angemessen. Die strategische Ausrichtung des Bereichs „Technische Zusammenarbeit“ in der PTB sollte weiter geschärft werden.

Die Transferanstrengungen der PTB, die u. a. maßgeblich zur Weltmarktstellung der optischen Industrie Deutschlands beitragen, sind vorbildlich. Die Kooperationen der PTB mit der Industrie stellen einen wichtigen Weg des Technologietransfers dar. Begrüßenswert ist das PTB-eigene Programm „Transfer Metrologischer Technologien“ (TransMeT). |⁹³ Die PTB genießt große Wertschätzung bei Nutzerinnen und Nutzern in den unterschiedlichen Bereichen der Wirtschaft. Sie pflegt einen sehr intensiven Austausch mit Fachverbänden und Netzwerken mit anwendungsorientierter Ausrichtung, die für den Technologietransfer eine zentrale Rolle spielen. Mit dem BMWi besteht eine Zielvereinbarung hinsichtlich der Unterstützung der Wirtschaft, der strategischen

|⁹² Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter der PTB werden zum Teil an das BMZ entsandt, das diese Aktivitäten auch finanziell, etwa durch die Übernahme von Reisekosten, unterstützt.

|⁹³ Technologietransfer über Kooperationen wurde im Erhebungszeitraum durch ein spezielles im Bereich des BMWi angesiedeltes Programm „MNPQ-Transfer“ („Messen, Normen, Prüfen, Qualitätssicherung“) gefördert. Dessen Nachfolger ist seit 2015 das PTB-eigene Programm TransMeT.

Auswahl von Technologietransfer-Wegen und der Unterstützung des europäischen Metrologieprogramms EMPIR.

Besonders hervorzuheben sind die Beiträge zum Wissenstransfer, den die PTB im Rahmen ihrer Aktivitäten zur Regelsetzung und Normung leistet. Ein Schwerpunkt ihrer Beratungsleistungen liegt in der Mitarbeit in mehr als 400 Normungsgremien auf nationaler und internationaler Ebene.

Die Patentstrategie der Bundesanstalt hat durch eine recht rigorose Technologiebewertung im Rahmen der Patentfilterung eine hohe Effektivität erreicht, was sich in 50 Patentanmeldungen im Erhebungszeitraum 2013 bis 2015 (rund 17 Patentanmeldungen im Jahr) niederschlägt.

Darüber hinaus ist sie sehr aktiv bei der Förderung von Existenzgründungen. Ein aktuelles Beispiel hierfür ist die Entwicklung und Produktion eines Kabels mit integriertem Stromzähler.

II.3 Kooperationen

Die PTB genießt hohe Wertschätzung in der wissenschaftlichen Fachgemeinschaft und ist sehr gut vernetzt mit universitären und außeruniversitären Forschungseinrichtungen im In- und Ausland. Besonders hervorzuheben ist die intensive Zusammenarbeit der PTB in europäischen Forschungsprogrammen und wissenschaftlichen Netzwerken auf europäischer Ebene, oftmals in leitender Funktion. Anzuführen sind hier beispielsweise das Forschungsprogramm EMRP und das Nachfolgeprogramm EMPIR, dessen Vorsitz von 2010 bis 2015 bei einem Präsidiumsmitglied der PTB lag. Die strategisch vernetzte Verbundforschung in den europäischen Metrologieprogrammen ist außerordentlich wichtig, um europarelevante Interessengebiete fachspezifisch zu bündeln und längerfristig zu bearbeiten.

Im regionalen Kontext ist die PTB mit der TU Braunschweig über zwei gemeinsame Berufungen und gemeinsame Aktivitäten in Forschung, Lehre und Nachwuchsförderung eng verbunden. Dass die Metrologie seit kurzem zu den insgesamt vier Forschungsschwerpunkten der TU Braunschweig gehört, ist eine sehr positive Entwicklung und unterstreicht die enge Kooperation beider Einrichtungen. Diese thematische Fokussierung und Verknüpfung von Ressourcen wird ausdrücklich unterstützt. Zudem kooperiert die PTB eng mit der Universität Hannover, vor allem im Bereich der Quantentechnologie, und auch mit der Charité Berlin im Bereich der Medizinphysik. In weiteren Bereichen, z. B. Dosimetrie und CT, wird jedoch eine Intensivierung der Zusammenarbeit mit Hochschulen empfohlen. Die PTB sollte die Kooperation mit den jeweils fachlich bestmöglichen Partnern noch gezielter anstreben.

Die PTB hat interne und externe Instrumente der Qualitätskontrolle im Bereich Forschung und Dienstleistung in vorbildlicher Weise implementiert und in die Praxis umgesetzt. Dies gilt entsprechend für die Qualitätssicherungsmaßnahmen im Personalbereich. Die Einhaltung der Grundsätze zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis wird jährlich intern überprüft und ist Gegenstand der Managementbewertung.

B.III ORGANISATION UND AUSSTATTUNG

III.1 Organisation

Die Organisationsstruktur der PTB ist adäquat und gut geeignet, um die umfassenden, überwiegend gesetzlichen Aufgaben reibungslos zu bewältigen. Die Einführung matrixartiger Strukturen ergänzt die traditionelle Abteilungsorganisation in nachvollziehbarer Weise und erlaubt eine umfangreiche programmorientierte Steuerung. Die PTB wird darin unterstützt, den eingeschlagenen Weg fortzuführen.

Das traditionsreiche Kuratorium der PTB, dem namhafte Vertreterinnen und Vertreter aus Wissenschaft und Wirtschaft angehören, übernimmt eine strategisch wichtige Schnittstellenfunktion. Größe und Zusammensetzung erlauben dem Gremium, seinen wissenschaftlichen Beratungsauftrag durch Einbeziehung von wissenschaftlicher Kompetenz und internationaler Perspektive zu erfüllen. Von Seiten des Kuratoriums wird betont, dass das BMWi seinen Empfehlungen nachweislich einen sehr hohen Stellenwert bei Entscheidungen einräumt.

Die Abstimmung und Zusammenarbeit zwischen dem BMWi und der PTB funktionieren offenkundig sehr gut und ermöglichen der Ressortforschungseinrichtung eine weitgehende Flexibilität. Es wird ausdrücklich gewürdigt, dass das BMWi die PTB bei der Anwendung von, dem Wissenschaftsfreiheitsgesetz entsprechenden, Flexibilisierungen unterstützt.

Der zwingend notwendige Aufbau der Metrologie für die Digitalisierung erfordert, wie bereits ausgeführt, eine klare Beauftragung der PTB. Der eingeleitete Prozess der interministeriellen Abstimmung wird daher begrüßt. Aufgrund der hochdynamischen Thematik wird jedoch eine Beschleunigung der Abstimmungsprozesse für dringend erforderlich gehalten. Empfohlen wird der zügige Aufbau mindestens einer Fachabteilung für die digitale Fertigungsmesstechnik (Metrologie im *Smart Manufacturing*).

III.2.a Personelle Ausstattung und Haushalt

Die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter der PTB schätzen das angenehme Arbeitsklima, die flexiblen und familienfreundlichen Arbeitszeitregelungen, die sehr guten Möglichkeiten der persönlichen Weiterentwicklung und fachlichen Fortbildung sowie die offene Kommunikationskultur. In allen Bereichen ist eine sehr hohe Motivation und Begeisterung der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter für ihre Arbeit wahrzunehmen, insgesamt besteht eine hohe Identifikation mit der Arbeitgeberin PTB.

Die Gewinnung von geeignetem Leitungspersonal stellt die PTB vor allem aufgrund der finanziellen Rahmenbedingungen zunehmend vor Schwierigkeiten. Im Rahmen der Bundesbesoldungsordnung sind Gewinnungs- und Leistungszulagen, die zur Anhebung von Gehältern gewährt werden können, zeitlich befristet. |⁹⁴ Um das hohe wissenschaftliche Leistungsniveau der PTB langfristig zu sichern, ist die Gewinnung von hochqualifizierten Personen jedoch unabdingbar. Die Rekrutierung erfordert attraktive und gesicherte finanzielle Regelungen. Eine Verstetigung der Zulagen wird als notwendig erachtet, damit die PTB mittel- und längerfristig im Wettbewerb um die „besten Köpfe“ mit Universitäten und Industrieunternehmen konkurrenzfähig sein kann. Überdacht werden sollte ferner die (zweijährige) Probezeitregelung, die bei einer Neubesetzung des Präsidentenamtes vorgesehen ist.

Für den Aufbau neuer Strukturen auf dem Gebiet der metrologischen Informationstechnik benötigt die PTB entsprechende Kompetenzen. Diese lassen sich nicht vollständig aus dem vorhandenen Personal zusammenstellen, daher ist eine Erweiterung des informationstechnischen Kompetenzportfolios in Verbindung mit einer geeigneten Nachwuchsförderung unverzichtbar. Da diese Anforderung bereits für die Vorbereitung der Prozesse gilt, ist der Handlungsbedarf entsprechend groß.

Die finanzielle Lage der PTB ist gegenwärtig solide. Dies belegt insbesondere die Ausstattung mit Geräten und anderen hochwertigen, in Teilen weltweit

| ⁹⁴ Neben der W-Besoldung für Professuren können flexible Leistungselemente gewährt werden, was bei den Führungskräften in der PTB mit B-Besoldung rechtlich nicht möglich ist. Zur Gewinnung besonders qualifizierter Spitzenkräfte können zwar grundsätzlich Personalgewinnungszuschläge (für Beamte gemäß § 43 BBesG) bzw. -zulagen (für tariflich bzw. außertariflich Beschäftigte gemäß den Sonderzahlungsgrundsätzen für Ressortforschungseinrichtungen) gewährt werden. Die Voraussetzungen sowie die Nachweis- und Dokumentationspflichten für die Gewährung sind dabei nach Einschätzung der PTB aufwendig und teilweise schwer umsetzbar (z. B. hinsichtlich der Forderung schriftlicher Konkurrenzangebote). Die Gewährung von Personalgewinnungszuschlägen an Beamte ist nur zeitlich befristet möglich. Diese können für einen Zeitraum von zweimal 4 Jahren oder einmal für einen Zeitraum von insgesamt 6 Jahren vergeben werden. Die Gewährung von Personalgewinnungszulagen an Beschäftigte ist befristet, in besonderen Fällen auch unbefristet möglich.

einzigartigen Forschungsinfrastrukturen. Durch die Anwendung dem Wissenschaftsfreiheitsgesetz entsprechender Flexibilisierungen verfügt sie auch über die für eine Wissenschaftseinrichtung sinnvolle haushälterische Flexibilität. Vor dem Hintergrund der umfangreichen Aufgaben und des notwendigen Aufbaus zukunftsorientierter neuer Themenfelder wird allerdings der ab 2016 unzureichende Haushaltszuwachs mit großer Sorge betrachtet. Um das erreichte hohe Qualitätsniveau halten zu können, ist bereits zum jetzigen Zeitpunkt eine Angleichung erforderlich, der Mittelbedarf wird sich künftig durch die Übernahme neuer Aufgaben noch weiter erhöhen. Eine zukunftsfeste Position der PTB im internationalen Wettbewerb erfordert einen gesicherten finanziellen Aufwuchs über mehrere Jahre und gezielte Investitionen für den Aufbau neuer relevanter Themengebiete. Zu empfehlen ist daher ein jährlicher Mittelaufwuchs mindestens in Höhe eines Inflationsausgleichs. Bei der Übernahme neuer gesetzlicher Aufgaben sollten künftig grundsätzlich die dafür erforderlichen personellen Ressourcen in der Grundfinanzierung abgedeckt werden.

III.2.b Räumliche und infrastrukturelle Ausstattung

Für die Erfüllung der derzeitigen Aufgaben verfügt die PTB insgesamt über eine wissenschaftlich kompetitive Ausstattung. Die PTB-eigene *Metrology Light Source*, die Elektronenbeschleunigeranlage für die Dosimetrie in der Strahlentherapie, das Reinraumzentrum und die Kraft- und Drehmoment-Normalmess-einrichtungen sind nur einige prominente Beispiele der hervorragenden, teilweise weltweit einzigartigen Forschungsinfrastruktur. Dass die PTB ihre größeren Mess- und Forschungseinrichtungen externen Nutzerinnen und Nutzern anbietet, ist sehr begrüßenswert. Positiv bewertet wird auch die Verpflichtung der PTB, im Rahmen der europäischen Koordinierung mit anderen metrologischen Instituten eine Reihe der hochwertigen Forschungsinfrastrukturen für die gemeinsame Nutzung zur Verfügung zu stellen.

Die Gebäudesituation ist derzeit im Wesentlichen noch als gut zu bewerten. Sehr begrüßenswert ist das Programm (Liegenschaftskonzept und Masterplan) zur notwendigen Modernisierung und zum Ausbau der Gebäude |⁹⁵ bis zum Jahr 2035 in einem Gesamtumfang von 332 Mio. Euro. Dabei sollte auf ausreichend Flexibilität bei der Durchführung der Baumaßnahmen sowie auf ausreichende Kapazitäten in der staatlichen Bauverwaltung geachtet werden, um der PTB möglichst reibungslose Arbeitsabläufe zu ermöglichen.

| ⁹⁵ Ein großer Teil der Gebäude stammt aus den 1950er Jahren.

Anhang

Stand: 31.12.2015

Präsident	Vizepräsident	Mitglied des Präsidiums	Präsidentialer Stab	Presse- und Öffentlichkeitsarbeit	Konformitätsbewertungsstelle	Leiter des Instituts Berlin	Qualitätsmanager	Interne Revision	Abteilung Z
Abteilung 1 Mechanik und Akustik	Abteilung 2 Elektrizität	Abteilung 3 Chemische Physik und Explosionschutz	Abteilung 4 Optik	Abteilung 5 Fertigungsmesstechnik	Abteilung 6 Ionisierende Strahlung	Abteilung 7 Temperatur und Synchrotronstrahlung	Abteilung 8 Medizinphysik u. metrologische Informations-technik	Abteilung Q Wissenschaftlich-technische Querschnittsaufgaben	Abteilung Z Verwaltungs-dienste
Fachbereich 1.1 Masse - Weitergabe der Einheit	Fachbereich 2.1 Gleichstrom und Niederfrequenz	Fachbereich 3.1 Metrologie in der Chemie	Fachbereich 4.1 Photometrie u. angewandte Radiometrie	Fachbereich 5.1 Oberflächenmesstechnik	Fachbereich 6.1 Radioaktivität	Fachbereich 7.1 Radiometrie mit Synchrotronstrahlung	Fachbereich 8.1 Medizinische Messtechnik	Referat Q.11 Wissenschaftliche Bibliotheken	Referat Z.11 Haushalt und Beschaffung
Fachbereich 1.2 Festkörpermechanik	Fachbereich 2.2 Hochfrequenz und Felder	Fachbereich 3.2 Gasanalytik und Zustandsverhalten	Fachbereich 4.2 Bild- und Wellenoptik	Fachbereich 5.2 Dimensionelle Nanometrologie	Fachbereich 6.2 Dosimetrie für Strahlentherapie und Röntgen-diagnostik	Fachbereich 7.2 Kryophysik und Spektrometrie	Fachbereich 8.2 Biosignale	Referat Q.12 Sprachendienst	Referat Z.12 Personal
Fachbereich 1.3 Geschwindigkeit	Fachbereich 2.3 Elektrische Energie-messtechnik	Fachbereich 3.3 Thermo-physikalische Größen	Fachbereich 4.3 Quantenoptik und Längeneinheit	Fachbereich 5.3 Koordinatenmesstechnik	Fachbereich 6.3 Strahlenschutz-dosimetrie	Fachbereich 7.3 Detektorradiometrie und Strahlungs-thermometrie	Fachbereich 8.3 Biomedizinische Optik	Fachbereich Q.3 Gesetzliches Messwesen und Technologie-transfer	Referat Z.13 Justizrat
Fachbereich 1.4 Gase	Fachbereich 2.4 Quanten-elektronik	Fachbereich 3.4 Physikalische Chemie	Fachbereich 4.4 Zeit und Frequenz	Fachbereich 5.4 Interferometrie an Maßverkörperungen	Fachbereich 6.4 Neutronen-strahlung	Fachbereich 7.4 Temperatur	Fachbereich 8.4 Mathematische Modellierung und Datenanalyse	Fachbereich Q.4 Informationstechnologie	Referat Z.14 Organisation und Controlling
Fachbereich 1.5 Flüssigkeiten	Fachbereich 2.5 Halbleiter-physik und Magnetismus	Fachbereich 3.5 Explosions-schutz in der Energietechnik		Fachbereich 5.5 Wissenschaftlicher Gerätebau	Fachbereich 6.5 Strahlenwirkung	Fachbereich 7.5 Wärme und Vakuum	Fachbereich 8.5 Metrologische Informations-technik	Fachbereich Q.5 Technische Zusammenarbeit	Referat Z.15 Verwaltung Berlin
Fachbereich 1.6 Schall	Fachbereich 2.6 Elektrische Quanten-metrologie	Fachbereich 3.6 Explosionsge-schützte Sensoren und Messtechnik			Referat 6.71 Betrieblicher Strahlenschutz		Fachbereich IB.T Technisch-wissenschaftliche Infrastruktur Berlin	Gruppe Q.6 Technische Infrastruktur	Referat Z.16 Innerer Dienst
Fachbereich 1.7 Akustik und Dynamik	Fachbereich 3.7 Grundlagen des Explosions-schutzes							Referat Q.61 Arbeitsschutz- und Sicherheitsmanagement	Referat Z.17 Ausbildung
Fachbereich 1.8 Masse - Darstellung der Einheit								Referat Q.62 Technischer Dienst Braunschweig	Referat Z.18 Betriebliche Fachanwendungen
									Referat Q.63 Werkfeuerwehr
									<p>QUEST Institut an der PTB</p> <p>Ausschüsse: Personal Investitionen IT-Infrastruktur Metrologische Dienstleistungen Internationale Zusammenarbeit Qualitätsmanagement Forschungsprogramme</p>

Quelle: Wissenschaftsrat nach Angaben der PTB

Stand: 31.12.2015

Stellenbezeichnung	Wertigkeit der Stellen (Besoldungs- / Entgeltgruppe)	Zahl der Stellen insgesamt (Soll)	darunter tatsächlich besetzt (Ist)
Stellen für wissenschaftliches Personal*	B 8	1,0	1,0
	B 4	1,0	1,0
	B 3	7,0	7,0
	B 2	29,0	28,0
	B 1 / AT B	24,0	16,0
	A 16	1,0	1,0
	A 15 / E 15	44,0	51,0
	A 14 / E 14	163,0	186,5
	A 13 h / E 13	56,0	17,0
Zwischensumme		326,0	308,5
Stellen für nichtwissenschaftliches Personal	B 2	3,0	3,0
	B 1	1,0	1,0
	A 16	1,0	1,0
	A 15 / E 15	13,0	13,0
	A 14 / E 14	12,0	11,0
	A 13 h / E 13	6,0	6,0
	A 13 g + Z	4,0	3,0
	A 13 g / E 13	33,0	34,0
	A 12 / E 12	110,0	122,0
	A 11 / E 11	120,0	105,0
	A 10 / E 10	70,0	44,0
	A 9 g	0,0	1,0
	A 9 m + Z	11,0	11,0
	A 9 m / E 9	128,0	185,0
	A 8 / E 8	154,0	114,0
	A 7 / E 7	72,0	82,0
	A 6 m / E 6	118,5	91,0
	E 5	56,0	35,0
	E 4	6,0	7,0
E 3	29,0	24,0	
Zwischensumme		947,5	893,0
I n s g e s a m t		1.273,5	1.201,5

* Unter „wissenschaftlichem Personal“ oder „Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler“ werden alle Mitarbeiter und Mitarbeiterinnen (einschließlich der Leitung) der Einrichtung verstanden, die im höheren Dienst oder einer analogen Entgeltgruppe für Angestellte beschäftigt und ganz oder überwiegend wissenschaftlich tätig sind.

Quelle: Wissenschaftsrat nach Angaben der PTB

Anhang 3: Verteilung des wissenschaftlichen Personals in der PTB auf die einzelnen Arbeitsbereiche

Stand: 31.12.2015

Abteilung/Arbeitsbereich	Institutionelle Stellen (VZÄ) für Wissenschaftler/innen			Drittmittelfinanzierte Stellen (VZÄ) für Wissenschaftler/innen			Mit wissenschaftlichem Personal besetzte, aus Aushilfs-/Annex-Titeln finanzierte Stellen (VZÄ)		
	insgesamt	darunter befristet besetzt	darunter unbesetzt	insgesamt	darunter befristet besetzt	darunter unbesetzt	insgesamt	darunter befristet besetzt	darunter unbesetzt
Leitungsbereich *	29,0	-	13,0	-	-	-	4,0	4,0	-
Institut QUEST	2,0	-	-	4,4	4,4	-	12,0	12,0	-
Abt.1 Mechanik und Akustik	35,5	-	0,5	13,8	13,8	-	11,0	11,0	-
Abt.2 Elektrizität	38,0	1,0	-	20,7	20,7	-	6,0	6,0	-
Abt.3 Chem. Physik u. Explosionsschutz	44,0	1,0	2,0	27,2	25,2	-	13,0	13,0	-
Abt.4 Optik	31,0	2,0	-	26,9	25,9	-	16,0	16,0	-
Abt.5 Fertigungsmesstechnik	38,0	-	-	26,7	25,7	-	7,0	7,0	-
Abt.6 Ionisierende Strahlung	35,0	-	2,0	8,7	8,7	-	13,0	13,0	-
Abt.7 Temp. und Synchrotronstrahlung	34,0	-	-	30,6	30,6	-	7,0	7,0	-
Abt.8 Medizinphysik u. metrolog. Inform.	39,5	1,0	-	22,0	22,0	-	15,0	15,0	-
I n s g e s a m t	326,0	5,0	17,5	181,0	177,0	-	104,0	104,0	-

* Inklusive 22,0 institutionelle Stellen für Theorie-Gruppe, Trainee-Programm sowie strategische Reserve.

Anhang 4: Dauer und Zugehörigkeit, Altersstruktur, Geschlecht und Fachrichtung des wissenschaftlichen Personals

Stand: 31.12.2015

Zugehörigkeit	Anzahl	
	männlich	weiblich
20 Jahre und mehr	118	6
15 bis unter 20 Jahre	53	8
10 bis unter 15 Jahre	66	6
5 bis unter 10 Jahre	60	22
unter 5 Jahre	188	76

Alter	Anzahl	
	männlich	weiblich
60 Jahre und älter	48	7
50 bis unter 60 Jahre	124	6
40 bis unter 50 Jahre	115	16
30 bis unter 40 Jahre	144	64
unter 30 Jahre	54	25

Geschlecht	Anzahl
männlich	485
weiblich	118

Fachrichtung des Hochschulabschlusses (häufigste Abschlüsse)	Anzahl	
	männlich	weiblich
Fachrichtung Physik	396	92
Fachrichtung Elektrotechnik	53	9
Fachrichtung Maschinenbau	20	3
Fachrichtung Chemie	12	9
Sonstige (z. B. Geographie, Mathematik, Wirtschaftswiss./Volkswirtschaft, Agrarwissenschaften)	4	5

Quelle: Wissenschaftsrat nach Angaben der PTB

Veröffentlichungsform	Abteilung 1			Abteilung 2			Abteilung 3			Abteilung 4			Abteilung 5			Abteilung 6		
	2013	2014	2015	2013	2014	2015	2013	2014	2015	2013	2014	2015	2013	2014	2015	2013	2014	2015
	in referierten Zeitschriften	21 ⁶	25 ⁸	26 ¹⁰	40 ³	28 ¹	47 ⁸	24 ⁶	35 ³	38 ⁸	22 ³	28 ⁵	23 ⁵	14 ⁴	25 ⁸	25 ⁶	27 ³	63 ⁸
Aufsätze in nicht referierten Zeitschriften	6	9 ⁴	7 ¹	6	2 ¹	3	12	16	3	13 ⁶	5 ⁴	9 ⁴	8	10 ⁴	13 ³	4	2	6
Monographien	1	2	0	3	6	1	5	8	0	2	2	2	2	0	1	1	1	1
Eigenständige referiert	3	9 ¹	8 ²	3	4	3	6	8 ¹	6	2	8 ²	4 ¹	2	4	5	7 ¹	16	16 ¹
Internetpublikationen nicht referiert	4	1 ¹	26 ⁵	12	5 ¹	2	5	2	2 ¹	25 ⁵	22 ⁵	7	8 ²	3	14 ³	2	4	4
Beiträge zu Sammelwerken im Fremdverlag	27 ⁷	48 ⁷	24 ⁵	15 ²	45 ⁶	11	26 ⁵	15 ⁴	15	13 ⁴	15 ⁶	8 ¹	28 ³	21 ³	13 ³	16 ²	13	7
Beiträge zu Publikationen im Eigenverlag	5 ³	1 ¹	7	0	0	4	23 ³	4 ¹	4	0	0	6	0	0	0	21	6	8
Zwischensumme Publikationen	67¹⁶	95²²	98²³	79⁵	90⁹	71⁸	101¹⁴	88⁹	68⁹	77¹⁸	80²²	59¹¹	62⁹	63¹⁵	71¹⁵	78⁶	105⁸	96³
Interne Stellungnahmen / Politikpapiere	Eine Auflistung der Politikpapiere und internen Stellungnahmen sei dem Institut mit vertretbarem Aufwand nicht möglich, insbesondere auch wegen der Abgrenzungsproblematik zwischen solchen Papieren und Beiträgen zu Normierungsgremien, Regelungsgremien oder auf Schulungsveranstaltungen.																	
Vorträge	94 ²¹	133 ³³	128 ²³	75 ⁴	110 ¹⁵	83 ⁸	183 ¹⁶	172 ¹⁶	135 ⁵	110 ²⁴	100 ³⁰	93 ¹⁷	113 ¹⁸	116 ²⁶	84 ¹⁵	126 ⁹	90	93 ³
darunter: referierte Konferenzbeiträge	32 ⁷	44 ²⁰	46 ¹²	33 ³	57 ¹⁰	26 ⁴	51 ³	47 ⁶	31 ³	38 ⁹	35 ¹⁶	34 ¹²	60 ⁵	63 ¹⁴	29 ⁶	42 ⁶	12	28 ²
Insgesamt	161³⁷	228⁵⁵	226⁴⁶	154⁹	200²⁴	154¹⁶	284³⁰	260²⁵	203¹⁴	187⁴²	180⁵²	152²⁸	175²⁷	179⁴¹	155³⁰	204¹⁵	195⁸	189⁶

Bei den kursiv gestellten Zahlen handelt es sich um eine darunter-Position an Publikationen und Vorträgen, an denen Ko-Autoren aus anderen Abteilungen beteiligt waren.

Stand: 31.12.2015

Veröffentlichungsform	Abteilung 7 mit IB.T		Abteilung 8			Abteilung Q			Präsidium mit PSt			QUEST			Summe Autorenschaften aus mehr als einer Abteilung wurden nur einfach gezählt				Insgesamt															
	2013	2014	2015	2013	2014	2015	2013	2014	2015	2013	2014	2015	2013	2014	2015	2013	2014	2015																
	in referierten Zeitschriften	64	73	69	56	70	74	7	1	7	25	27	14	11	3	11	6	281		346	345	972												
Aufsätze in nichtreferierten Zeitschriften	8	7	11	11	6	10	2	1	1	0	1	0	0	0	0	0	64	50	56	170														
Monographien	5	1	2	4	3	2	1	1	0	0	0	0	1	3	1	25	27	10	62															
Eigenständige referiert	3	2	3	7	4	10	0	0	1	3	3	3	2	1	0	36	56	55	147															
Internet- publikationen	7	2	3	3	5	5	0	1	0	2	0	1	0	0	0	63	39	55	157															
nicht referiert	48	3	42	27	23	28	0	3	2	2	2	0	0	0	0	186	205	108	499															
Beiträge zu Sammelwerken im Fremdverlag	1	13	0	3	0	7	0	0	1	1	0	0	0	0	0	51	23	37	111															
Beiträge zu Publikationen im Eigenverlag	136	13	141	111	111	136	10	7	11	33	33	18	14	7	12	706	746	666	2.118															
Zwischensumme Publikationen																																		
Interne Stellungnahmen/Politikpapiere	Eine Auflistung der Politikpapiere und internen Stellungnahmen sei dem Institut mit vertretbarem Aufwand nicht möglich, insbesondere auch wegen der Abgrenzungsproblematik zwischen solchen Papieren und Beiträgen zu Normierungsgremien, Regelungsgremien oder auf Schulungsveranstaltungen.																																	
Vorträge	185	14	165	22	123	20	147	21	148	27	19	6	22	5	16	9	23	10	21	0	24	5	47	6	30	32	4	1.003	1.017	886	2.906			
darunter: referierte Konferenzbeiträge	89	7	86	17	56	13	56	13	75	13	77	20	7	3	5	2	6	6	2	0	5	2	4	4	4	9	1	380	378	304	1.062			
Insgesamt	321	27	306	42	218	36	218	29	258	42	284	44	29	14	29	8	27	17	56	18	54	8	42	11	61	11	37	0	44	10	1.709	1.763	1.552	5.024

Bei den kursiv gestellten Zahlen handelt es sich um eine darunter-Position an Publikationen und Vorträgen, an denen Ko-Autoren aus anderen Abteilungen beteiligt waren.

Quelle: Wissenschaftsrat nach Angaben der PTB

Anhang 6: Von der PTB in den Jahren 2013 bis 2015 vereinnahmte Drittmittel nach Drittmittelgebern

Stand: 31.12.2015

Abteilung/Arbeitsbereich	Drittmittelgeber	Drittmittel in Tsd. Euro (gerundet)			Summe
		2013	2014	2015	
	DFG	0	0	0	0
Präsidium	Bund	0	0	0	0
Präsidentiale Stabsstelle	Land/Länder	0	0	0	0
	EU	3.095	2.805	1.000	6.900
	ERC	0	0	0	0
	Wirtschaft	0	0	0	0
	Stiftungen	0	0	0	0
	Sonstige*	0	0	0	0
Summe		3.095	2.805	1.000	6.900
	DFG	98	13	0	111
Abteilung 1	Bund	283	214	237	734
	Land/Länder	21	0	0	21
	EU	1.182	505	323	2.010
	ERC	0	0	0	0
	Wirtschaft	131	182	145	458
	Stiftungen	0	0	0	0
	Sonstige*	80	13	28	121
Summe		1.795	927	733	3.455
	DFG	256	151	153	560
Abteilung 2	Bund	233	395	404	1.032
	Land/Länder	83	27	53	163
	EU	2.067	769	1.002	3.838
	ERC	0	0	0	0
	Wirtschaft	126	21	0	147
	Stiftungen	45	50	15	110
	Sonstige*	27	12	0	39
Summe		2.837	1.425	1.627	5.889
	DFG	207	206	207	620
Abteilung 3	Bund	101	227	11	339
	Land/Länder	0	8	27	35
	EU	2.356	2.590	428	5.374
	ERC	0	0	0	0
	Wirtschaft	601	340	347	1.288
	Stiftungen	0	0	0	0
	Sonstige*	222	237	318	777
Summe		3.487	3.608	1.338	8.433
	DFG	326	268	457	1.051
Abteilung 4	Bund	209	364	427	1.000
	Land/Länder	101	133	285	519
	EU	1.504	2.345	873	4.722
	ERC	0	0	0	0
	Wirtschaft	522	243	243	1.008
	Stiftungen	2	10	6	18
	Sonstige*	381	329	190	900
Summe		3.045	3.692	2.481	9.218
	DFG	176	161	185	522
Abteilung 5	Bund	990	470	332	1.792
	Land/Länder	4	51	35	90
	EU	1.834	1.456	924	4.214
	ERC	0	0	0	0
	Wirtschaft	306	69	44	419
	Stiftungen	0	0	0	0
	Sonstige*	42	36	117	195
Summe		3.352	2.243	1.637	7.232

Abteilung/Arbeitsbereich	Drittmittelgeber	Drittmittel in Tsd. Euro (gerundet)			Summe
		2013	2014	2015	
Abteilung 6	DFG	0	0	4	4
	Bund	228	36	1	265
	Land/Länder	0	0	5	5
	EU	900	968	24	1.892
	ERC	0	0	0	0
	Wirtschaft	8	10	0	18
	Stiftungen	0	0	0	0
	Sonstige*	55	76	7	138
Summe		1.191	1.090	41	2.322
Abteilung 7	DFG	127	41	67	235
	Bund	308	446	383	1.137
	Land/Länder	158	126	43	327
	EU	1.533	1.785	1.537	4.855
	ERC	0	0	0	0
	Wirtschaft	1.089	871	717	2.677
	Stiftungen	65	30	55	150
	Sonstige*	683	333	203	1.219
Summe		3.963	3.632	3.005	10.600
Abteilung 8	DFG	578	616	479	1.673
	Bund	913	563	557	2.033
	Land/Länder	0	0	20	20
	EU	1.010	923	539	2.472
	ERC	0	0	0	0
	Wirtschaft	83	45	35	163
	Stiftungen	0	0	15	15
	Sonstige*	0	0	0	0
Summe		2.584	2.147	1.645	6.376
Abteilung Q	DFG	67	35	0	102
	Bund	10.098	10.500	14.500	35.098
	Land/Länder	0	0	0	0
	EU	0	0	0	0
	ERC	0	0	0	0
	Wirtschaft	0	0	0	0
	Stiftungen	0	0	0	0
	Sonstige*	0	0	60	60
Summe		10.165	10.535	14.560	35.260
QUEST Institut	DFG	0	0	0	0
	Bund	0	0	0	0
	Land/Länder	339	222	0	561
	EU	0	0	0	0
	ERC	0	0	0	0
	Wirtschaft	0	0	0	0
	Stiftungen	0	0	0	0
	Sonstige*	0	0	0	0
Summe		339	222	0	561
Institut gesamt	DFG	1.835	1.491	1.552	4.878
	Bund	13.363	13.215	16.852	43.430
	Land/Länder	706	567	468	1.741
	EU	15.481	14.146	6.650	36.277
	ERC	0	0	0	0
	Wirtschaft	2.866	1.781	1.531	6.178
	Stiftungen	112	90	91	293
	Sonstige*	1.490	1.036	923	3.449
Insgesamt		35.853	32.326	28.067	96.246

* Sonstige: Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen e.V., ausländische Universitäten, Berufs-genossenschaften, Fraunhofer Institute, Max-Planck-Institute, Leibniz-Institute, internationale Institute, Verbände, Vereine, usw.

Quelle: Wissenschaftsrat nach Angaben der PTB

- _ Pyka, K. et al.: Topological defect formation and spontaneous symmetry breaking in ion Coulomb crystals, *Nature Communications* 4, 2291 (2013).
- _ Whelan, R. et al., Neuropsychosocial profiles of current and future adolescent alcohol misusers, *Nature* 512, 185-189 (2014).
- _ Fricke, L. et al., Self-Referenced Single-Electron Quantized Current Source, *Phys. Rev. Lett.* 112, 226803 (2014).
- _ Lisdat, C. et al., A clock network for geodesy and fundamental science, *arXiv: 1511.07735* (2015).
- _ Azuma, Y. et al., Improved measurement results for the Avogadro constant using a 28-Si-enriched crystal, *Metrologia* 52, 360-375 (2015).

Quelle: Wissenschaftsrat nach Angaben der PTB

Die PTB verfügt – neben einer Abteilung für wissenschaftlich-technische Querschnittsaufgaben (Abteilung Q) und einer Verwaltungsabteilung – über die folgenden acht Fachabteilungen, in denen zu unterschiedlichen Anteilen FuE-Arbeiten betrieben sowie gesetzliche und Dienstleistungsaufgaben wahrgenommen werden:

1 – Mechanik und Akustik: Die acht Fachbereiche umfassende Abteilung widmet sich insbesondere Aufgaben des gesetzlichen Messwesens. Im Berichtszeitraum lag ein Tätigkeitsschwerpunkt auf der Umsetzung des neuen Mess- und Eichgesetzes sowie der entsprechenden Verordnung; dies war verbunden mit umfangreichen Beratungsaktivitäten für Eichbehörden und Gerätehersteller. Darüber hinaus war die Abteilung mit der Planung des Kompetenzzentrums „Windenergie“ und dem abteilungsübergreifenden Avogadroprojekt zur Neudefinition der SI-Einheit Kilogramm befasst.

2 – Elektrizität: Die Abteilung, zu der sechs Fachbereiche gehören, bearbeitet laut PTB alle Aspekte des Themenbereichs Elektrizität und Magnetismus in Verbindung mit dem elektrischen Messwesen. Die Arbeiten umfassen die Untersuchung metrologisch relevanter Prozesse in Festkörper-Nanoschaltungen, die Entwicklung von elektrischen Quanten-, Primär- und Transfernormalen sowie Kalibrier- und Prüfdienstleistungen. Darüber hinaus nimmt die Abteilung Beratungsaktivitäten wahr, arbeitet in Normungs- und sonstigen Gremien mit und ist im Technologietransfer tätig.

3 – Chemische Physik und Explosionsschutz: Die Arbeiten dieser aus sieben Fachbereichen bestehenden Abteilung werden durch die SI-Basiseinheit Mol und die Metrologie in der Chemie, die klassischen Hauptsätze der Thermodynamik und sicherheitsrelevante Fragen im Explosions- und Brandschutz bestimmt. Dies umfasst FuE für chemisch-analytische Primärmethoden und Normale besonders in Bereichen, in denen Messungen eine besondere gesellschaftliche Bedeutung haben wie z. B. im Umweltschutz, der Gesundheit und der Energieforschung.

4 – Optik: Die Aufgaben der vier Fachbereiche dieser Abteilung sind hauptsächlich den drei Themenbereichen (5) Länge und dimensionale Metrologie, (9) Photometrie und Radiometrie sowie (11) Zeit und Frequenz zuzuordnen. Im Themenbereich (5) Länge und dimensionale Metrologie bearbeitet die Abteilung als einen Schwerpunkt in der Nanometrologie die Charakterisierung nanostrukturierter Oberflächen. Arbeitsschwerpunkte der Abteilung im Themenbereich (9) Photometrie und Radiometrie sind die metrologische Bestimmung von physikalischen Größen zur Umweltüberwachung, die Neubestimmung der Basiseinheit Candela und die metrologische Charakterisierung von Solarzellen. Im Themenbereich (11) Zeit und Frequenz ist die Abteilung

Optik derzeit vor allem mit der Entwicklung optischer Uhren und neuen Methoden der Frequenzübertragung befasst.

Mit der Abteilung Optik assoziiert ist das QUEST-Institut / Institute for Experimental Quantum Metrology, das als gemeinsame Initiative von PTB und Universität Hannover aus dem Exzellenzcluster QUEST – *Centre for Quantum Engineering and Space-Time Research* (2007-14) hervorgegangen ist, an dem die PTB beteiligt war. Das an der PTB angesiedelte Institut umfasst drei Forschungsgruppen: *Multi-Ion Clocks*, *Trapped-Ion Quantum Engineering* und *Quantum Logic Spectroscopy*.

5 – Fertigungsmesstechnik: Die Abteilung mit ihren fünf Fachbereichen führt FuE im Bereich der messtechnischen Rückführung dimensioneller Größen mit den jeweils für die Anwendung geforderten Messunsicherheiten durch. Darauf aufbauend bietet sie Dienstleistungen im Bereich der Kalibrierung von Normalen, Validierung von messtechnischen Verfahren und Prüfung von speziellen Auswertalgorithmen an. Zudem werden Baumuster- und Entwurfsprüfungen für Längenmess-Maschinen und -Geräte gemäß der Europäischen Messgeräte-Richtlinie (MID) sowie von dimensionellen Messgeräten im Rahmen des Mess- und Eichgesetzes vorgenommen. Beschäftigte der Abteilung sind als Fach- und Systembegutachterinnen und -begutachter für die Deutsche Akkreditierungsstelle (DAkkS) aktiv, wirken bei „peer reviews“ von Metrologieinstituten anderer Länder mit und sind in nationalen und internationalen Normungsgremien tätig.

6 – Ionisierende Strahlung: Die Abteilung, die fünf Fachbereiche umfasst, konzentriert sich neben der direkten metrologischen Unterstützung medizinischer Anwendungen ionisierender Strahlung vor allem auf Untersuchungen zum grundlegenden Verständnis der Wirkmechanismen ionisierender Strahlung in biologischen Geweben, Fragen des Strahlenschutzes für Personal und Patienten sowie die Überwachung der Umwelt zum Schutz der Bevölkerung vor den Gefahren radioaktiver Stoffe. In Projekten der Grundlagenforschung ist die Abteilung mit der Entwicklung moderner Techniken für die Messung ionisierender Strahlung befasst.

7 – Temperatur und Synchrotronstrahlung: Aufgabe der Abteilung mit ihren fünf Fachbereichen ist die Darstellung, Bewahrung und Weitergabe strahlungsphysikalischer und thermodynamischer Einheiten, insbesondere für die spektrale Leistung elektromagnetischer Strahlung, die Temperatur, die Wärmeenergie sowie die Entwicklung neuer Verfahren und Technologien für diese Größen auch für Extrembereiche. Sie erbringt Dienstleistungen auf den Gebieten Thermometrie, Radiometrie, Messung thermischer Energie, Vakuum- und Nanometrologie und Spektrometrie und betreibt teilweise einzigartige Mess- und Prüfanlagen (zu den Forschungsinfrastrukturen vgl. A.II.2.c).

8 – Medizinphysik und metrologische Informationstechnik: Die Abteilung, die über fünf Fachbereiche verfügt, befasst sich mit der Weiterentwicklung und

dem Einsatz quantitativer Messverfahren sowohl für bildgebende Verfahren als auch in der Laboratoriumsmedizin, um eine vergleichbare Diagnose und Therapiekontrolle zu gewährleisten. Daneben spielen Fragen der Messunsicherheit, Standardisierung und neue Entwicklungen in der Informationstechnologie eine wichtige Rolle.

Unabhängig von der Abteilungsstruktur besteht seit 01.04.2016 das Institut „Fundamentale Physik für Metrologie“, das der Weiterentwicklung der Quantentheorie atomarer und mesoskopischer Systeme dient. Hierbei reichen die Aktivitäten des Instituts von der hochpräzisen Analyse atomarer Strukturen und Kollisionen über die Untersuchung kohärenter Prozesse in ultrakalten Quantengasen bis hin zur Modellierung von Phasenübergängen in magnetischen Systemen. Gemeinsames Ziel dieser Forschungsaktivitäten ist es, die Entwicklung neuer Metrologiestandards, die präzise Bestimmung von Naturkonstanten und die Formulierung von Tests fundamentaler Symmetrien der Natur zu unterstützen.

Zudem besteht in Kooperation mit der TU Braunschweig seit 01.04.2016 die Nachwuchsgruppe „Metrologie für funktionale Nanosysteme“, die sich der Entwicklung und Charakterisierung funktionaler Nanoobjekte (Nanostrukturen und Nanomaterialien) mit metrologischem Bezug widmet, zum Beispiel in den Themenbereichen Nanooptik, magnetische Nanomaterialien oder Nanopartikel. Zudem entwickelt sie Messmethoden und -geräte für die Nanometrologie.

- _ Antwort der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt auf den Fragenbogen des Wissenschaftsrates
- _ Organisationsstruktur
- _ Gesetzliche Aufgaben der PTB
- _ Satzung der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB)
- _ Arbeits- und Forschungsprogramm 2015 bis 2017
- _ Jahresbericht 2015
- _ Haushaltsplan der PTB, 2014
- _ Stellenplan und Übersicht über drittmittelfinanzierte Beschäftigungsverhältnisse
- _ Kennzahlen zum wissenschaftlichen Personal (Alter, Geschlecht, Dauer der Zugehörigkeit, Fachrichtung des Hochschulabschlusses)
- _ Liste der Publikationen von Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern
- _ Liste der Publikationen nach Abteilungen
- _ Liste der fünf wichtigsten Publikationen für jede Abteilungen
- _ Liste der Patentanmeldungen, Patenterteilungen, Lizenzverträge
- _ Vereinnahmte Drittmittel in den Jahren 2013-2015
- _ Liste der drittmittelgeförderten FuE-Projekte
- _ Liste der seit 2012 abgeschlossenen Habilitations- und Promotionsarbeiten
- _ Liste der nationalen und internationalen Veranstaltungen, die die PTB zwischen 2013 und 2015 ausgerichtet hat
- _ Liste der Invited Talks von Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der PTB in den Jahren 2013 bis 20015
- _ Geschäftsordnung des Ausschusses der Konformitätsbewertungsstellen (GO-AdKBS)
- _ Liste der Mitglieder im Ausschuss der Konformitätsbewertungsstellen
- _ Geschäftsordnung für die Fachausschüsse des Deutschen Kalibrierdienstes
- _ Geschäftsordnung für den Vorstand des Deutschen Kalibrierdienstes
- _ Kuratorium der PTB
- _ Liste der Mitglieder des Kuratoriums
- _ Protokolle der Sitzungen des Kuratoriums in den Jahren 2013 bis 2015
- _ Finaler Report Division 6
- _ Geschäftsordnung des Regelermittlungsausschusses (GO-REA)
- _ Liste der Mitglieder des Regelermittlungsausschusses
- _ Geschäftsordnung der Vollversammlung für das Mess- und Eichwesen (GO-VV)
- _ Übersicht Kooperationen
- _ Liste der Forschungsinfrastrukturen, die die Einrichtung selbst betreibt oder an deren Betrieb sie beteiligt ist
- _ Ausführungen zum NanoStrategieprozess
- _ Planungsabläufe in der PTB
- _ Zielvereinbarung für die Jahre 2015 bis 2019 zwischen dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie und der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt
- _ Hausverfügung Ausschüsse
- _ Masterplan für die bauliche Entwicklung der PTB von 2016 bis 2035
- _ PTB-Geschäftsordnung
- _ The European Traceability Network: Airline Maps 2015
- _ QM-Verfahrensanleitung

- _ PTB-Selbsterklärung zum Qualitätsmanagement
- _ Übersicht über Qualitätssicherung in der PTB
- _ Liste internationaler Leitungsfunktionen der PTB
- _ PTB-Pressespiegel 2015

ACES	ESA-Projekt <i>Atomic Clock Ensemble in Space</i>
AFM	Rasterkraftmikroskop (<i>atomic/scanning force microscope</i>)
BAM	Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin
BESSY	Berliner Elektronenspeicherring-Gesellschaft für Synchrotronstrahlung m.b.H.
BfS	Bundesamt für Strahlenschutz, Salzgitter
B-IGSM	<i>International Graduate School of Metrology</i> , Braunschweig
Bio	Biologie
BIPM	<i>Bureau International de Poids et Mesures</i>
BMAS	Bundesministerium für Arbeit und Soziales
BMEL	Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft
BMF	Bundesministerium der Finanzen
BMG	Bundesministerium für Gesundheit
BMI	Bundesministerium des Inneren
BMSR	<i>Berlin Magnetically Shielded Room</i>
BMUB	Bundesministerium für Umweltschutz, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
BMZ	Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung
BVL	Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit
CCU	<i>Consultative Committee for Units</i>
CGPM	<i>Conférence Générale des Poids et Mesures</i>
CIPM	<i>Comité International de Poids et Mesures</i>
CIPM-MRA	„ <i>Mutual Recognition Arrangement</i> “ des <i>Comité International des Poids et Mesures</i>
CMC	<i>Calibration and Measurement Capabilities</i>
CT	Röntgen-Computertomografie

DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
DGKL	Deutsche Vereinte Gesellschaft für Klinische und Laboratoriumsmedizin
DiKo	Direktorenkonferenz
DIN	Deutsches Institut für Normung
DKD	Deutscher Kalibrierdienst
e.V.	Eingetragener Verein
EinhZeitG	Einheiten- und Zeit-Gesetz
EMPIR	<i>European Metrology Programme for Innovation and Research</i>
EMPR	<i>European Metrology Research Programme</i>
ESA	<i>European Space Agency</i>
EU	Europäische Union
EURAMET	<i>European Association of National Metrology Institutes</i>
EUROMET	Bis 2007: EUROMET; seither EURAMET e. V
EUV	Extrem-Ultraviolett-Strahlung
FANwing	Förder- und Arbeitskreis der Nachwuchswissenschaftler und -ingenieure
FPM	Fundamentale Physik für Metrologie
FuE	Forschung und Entwicklung
GeoQ	SFB zur relativistischen Geodäsie
GRK	Graduiertenkolleg
HDP	Hydrodynamische Prüffeld
HITech	<i>Hannover Institute for Technology</i>
HZB	Helmholtz-Zentrums Berlin
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
IT	Informations- und Datenverarbeitung
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
LED	Leuchtdiode
MDC	Max-Delbrück-Centrum für Molekulare Medizin, Berlin
MessEG	Mess- und Eichgesetz

MessEGebV	Mess- und Eichgebührenverordnung
METAS	Eidgenössische Institut für Metrologie, Schweiz
MID	Messgeräte Richtlinie
MINT	Mathematik, Informatik, Naturwissenschaft und Technik
Mio.	Millionen
MLS	<i>Metrology Light Source</i>
NMIJ	<i>National Metrology Institute of Japan</i>
MPI	Max-Planck-Institut
MRT	Magnetresonanztomographie
NAWID	Waagenrichtlinie
NIM	<i>National Institute of Metrology, China</i>
NIST	<i>National Institute of Standards and Technology, USA</i>
NMI	Naturwissenschaftliches und Medizinisches Institut an der Universität Tübingen
NPL	<i>National Physical Laboratory, Großbritannien</i>
OIML	<i>Organisation Internationale de Metrologie Legale</i>
PIAF	PTB-Ionenbeschleunigeranlage
PLTS	<i>Provisional Low Temperature Scale</i>
PTB	Physikalisch-Technischen Bundesanstalt
PTR	Physikalisch-Technische Reichsanstalt
QMS	Qualitätsmanagementsystem
QUEST	<i>Institute for Experimental Quantum Metrology</i>
REA	Regelermittlungsausschuss
RMO	<i>Regional Metrology Organization</i>
TNS	Transfer von Forschungs- und Entwicklungsergebnissen durch Normung und Standardisierung
TransMet	Transfer von metrologischer Technologie
Tsd.	Tausend
TU	Technische Universität
UBA	Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau

112	UPOB	Ultrapräzise Oberflächenbearbeitung
	USA	<i>United States of America</i>
	UTC	<i>Universal Time Coordinated</i>
	UV	Ultraviolett
	VUV	Vakuum-Ultraviolett
	VZÄ	Vollzeitäquivalente
	WELMEC	<i>European Cooperation in Legal Metrology</i>
	ZARM	Zentrum für angewandte Raumfahrttechnologie und Mikrogravitation, Bremen