

Aufgaben und Ziele der Themenbereiche für 2023–2025

Das Organigramm der PTB, mit seiner Gliederung in Abteilungen und Fachbereiche, dient hauptsächlich dazu, die Arbeiten der PTB zielgruppen- bzw. kundenorientiert darzustellen. Ergänzend dazu hat die PTB jedoch noch eine weitere Einteilung ihrer Tätigkeiten vorgenommen, die sich an den metrologischen Fachdisziplinen, den sogenannten Themenbereichen, orientiert. Sie umfassen das gesamte Spektrum der PTB, also hoheitliche Aufgaben und Dienstleistungen ebenso wie Forschung und Entwicklung, und spiegeln gleichzeitig die Art und Weise wider, wie in der PTB Aufgaben bearbeitet werden: durch die Nutzung von Synergien in enger Verflechtung der Geschäftsbereiche.

Die Gliederung der Themenbereiche orientiert sich am international vereinbarten Schema, wie es sich in den Strukturen der Meterkonvention, d. h. den Comités Consultatifs des CIPM oder in den technischen Komitees von EURAMET e. V., äußert. Mit vier ergänzenden Fachthemen „Metrologie für die Medizin“, „Mathematik und Informationstechnik“, „Physikalische Sicherheitstechnik und Explosionsschutz“ und „Nanometrologie“ ist wichtigen zusätzlichen Arbeitsfeldern der PTB Rechnung getragen. Die Einteilung in Themenbereiche dient dazu, die Schwerpunktsetzung und entsprechende Ressourcenzuteilung fachthemenbezogen durchzuführen und die fachbereichsübergreifende Arbeit zu fördern, ohne dabei die Struktur der Abteilungen aufzuheben.

Themenbereich 1:

Akustik, Ultraschall, Beschleunigung

Bearbeitet in den Fachbereichen 1.3, 1.6 und 1.7

Aufgaben

In diesem Themenbereich werden metrologische Fragestellungen bearbeitet, die die Darstellung und Weitergabe dynamischer mechanischer Einheiten zum Inhalt haben. Ausgehend von Forderungen des Einheiten- und Zeit-, des Mess- und Eich-, des Waffen-, des Beschuss- und des Medizinproduktegesetzes sowie der europäischen Messgeräte-richtlinie (MID) werden vielfältige wissenschaftliche Arbeiten durchgeführt und es erfolgen zahlreiche gesellschaftlich und wirtschaftlich notwendige Kalibrierungen, Prüfungen und Zulassungen industrienahe mit höchster Genauigkeit und Verlässlichkeit. Zur Deckung gegenwärtiger und zukünftiger Anforderungen werden hierzu folgende Aufgaben bearbeitet:

1. Entwicklung von Normalmesseinrichtungen und Kalibrierverfahren zur Darstellung und Weitergabe der SI-Einheiten für dynamisch-mechanische sowie akustische Größen für neue Anforderungen der Rückführung in Industrie und Gesellschaft.
2. Durchführung von Baumuster- und anderen Prüfungen sowie Entwicklung von Prüfverfahren und Referenzgeräten, -anlagen und -objekten insbesondere für die Sicherung der gesetzlichen messtechnischen Infrastruktur für Schwingungs-, Geschwindigkeits- und akustische Messung sowie waffenrechtliche Prüfungen.
3. Grundlagenuntersuchungen für neuartige Anwendungen zur Messung der Geschwindigkeit, akustischer und dynamisch-mechanischer Größen und zur Untersuchung der Wahrnehmung von Infra- und Luftultraschall.
4. Umsetzung neuer Konzepte der Digitalisierung in Schwingungs- und Schallmessung durch Einführung digitaler und smarter Sensoren, Entwicklung von Konzepten für sichere Schnittstellen, geschützte Architekturen und Prüfmethoden für verteilte und vernetzte Sensorsysteme, die dem Eichrecht genügen.
5. Entwicklung und Implementierung von neuen digitalen Formaten zur Erstellung und Lieferung digitaler Ergebnisberichte im Rahmen von Dienstleistungen für Kunden und des eigenen Qualitätsmanagements.

Geplante Arbeiten und Ziele

Zu 1.

- Entwicklung von neuartigen, effizienteren Anregungsmethoden und Kalibrierabläufen für die Primärkalibrierung von Schwingungssensoren bei sehr tiefen Frequenzen insbesondere für die metrologische Rückführung seismischer und geowissenschaftlich genutzter Messsysteme.

- Weiterentwicklung von Kalibrierverfahren für die Kalibrierung von elektromechanischen Beschleunigungs- und Druckaufnehmern mit dynamischen Signalen.
- Implementierung von neuen Kalibrierverfahren für die elektrische und optische Rückführung von Laservibrometern im Rahmen der Dienstleistung für die Industrie.
- Modernisierung und Vereinheitlichung der Maßtafeln der C.I.P. (Ständige Internationale Kommission für die Prüfung von Handfeuerwaffen) für das zivile Beschusswesen.
- Beratung der Beschussämter und der Polizei- und Ordnungsbehörden von Bund, Ländern und Kommunen in technischen Fragen des Waffen- und Beschussrechts; Mitwirkung in der deutschen Regierungsdelegation bei der Ständigen Internationalen Kommission für die Prüfung von Handfeuerwaffen.
- Entwicklung, Aufbau und internationale Validierung eines neuartigen primären Kalibrierverfahrens auf Basis hydrostatischer Druckänderungen im Infraschallfrequenzbereich bis 0,5 Hz für Mikrofone.
- Erneuerung des Messplatzes für die sekundäre Druckkalibrierung von Mikrofonen.
- Weiterentwicklung der Kalibrierverfahren für die Luftschalleistung auf der Basis eines Primärnormals.
- Bereitstellung von Referenzdaten für die Qualitätskontrolle von Ultraschallfeldmesssystemen bei industriellen Anwendungen.
- Überführung der neu entwickelten Messmethoden für die quantitative Bestimmung der lokalen Dosis am Menschen von Luftultraschall an Arbeitsplätzen und im öffentlichen Raum in die Normung.
- Ermittlung von Wahrnehmungs- und Lästigkeitsschwellen für die Wirkung von Infraschall auf den Menschen
- Entwicklung von Verfahren zur Bestimmung bauakustischer Kenngrößen auf Grundlage rückführbarer Schalleistungsmessungen.
- Untersuchungen zur Erweiterung des Frequenzbereichs der Schalldämmungsmessung zu tiefen Frequenzen (ca. 20 Hz).
- Entwicklung von Messtechnik und -methoden für die dynamische Kalibrierung von Laserinterferometern, Untersuchungen zur Eignung von halbleiterlaserbasierten Interferometern für die Kalibrierung von Schwingungsgrößen.

Zu 2.

- Planung und Aufbau eines Prüfzentrums für teilautomatisierte und autonome Fahrzeuge, im Hinblick auf die Rückführung der fusionierten Sensorik (Lidar, Radar, Ultraschall, Kameras, Trägheitssensorik, Radsensorik, GNSS) auch unter real erwartbaren Bedingungen, z. B. Wettereinflüssen oder anderen Beeinträchtigungen der Sensorfunktionsfähigkeit.
- Modernisierung und Ausbau der stationären Referenzanlagen der PTB zur Bestimmung der Geschwindigkeit vorbeifahrender Fahrzeuge an den beiden Messstandorten Bundesallee und Bundesautobahn A2.
- Entwicklung von akustischen und elektrischen Prüfmethoden und Messapparaturen für eine Baumusterprüfung von Schallpegelmessgeräten im Infraschall- und Ultraschallfrequenzbereich.
- Neuentwicklung von Konzepten und Messplätzen zur normkonformen Prüfung von Schallpegelmessgeräten mit mikromechanischen Mikrofonen und solchen mit digitalen Ausgangsformaten.

Zu 3.

- Entwicklung von neuartigen Verfahren für die On-site-Kalibrierung von stationären Sensoren und Sensorsystemen bei sehr tiefen Frequenzen, insbesondere für die metrologische Rückführung geowissenschaftlich genutzter Messstationen für seismische und Infraschall-Überwachung.
- Untersuchung der Verarbeitung von Infraschall im Ohr und im Gehirn durch psychoakustische und hirnelektrische (z. B. Elektroenzephalografie, EEG) Methoden; Test verschiedener Hypothesen wie z. B. zur Wahrnehmung von tieffrequent moduliertem Schall.

Zu 4.

- Entwicklung von Konzepten für digitale akustische und Beschleunigungssensoren und die Generierung und sichere Weitergabe von Messdaten in Netzwerken für öffentliche und industrielle Anwendungen (Industrie 4.0) und deren Qualitätskontrolle.
- Erweiterung und Anpassung der bestehenden dynamischen Kalibriermethoden und Einrichtungen zur Kalibrierung von Sensoren mit digitalen Ausgängen.
- Entwicklung von Konzepten und Prototypen von vernetzten, smarten Sensoren für dynamische Messungen unter metrologischen Gesichtspunkten wie beispielsweise validierten Korrekturalgorithmen und Echtzeitmessunsicherheitsberechnung.

Zu 5.

- Entwicklung von XML-Vorlagen für digitale Kalibrierscheine für die Anwendung im Rahmen akkreditierter Kalibrierungen in Abstimmung mit DKD-Laboratorien für akustische Messgrößen und die Größe Beschleunigung.
- Implementierung von generischen Verfahren zur vereinfachten automatisierten Erstellung digitaler Ergebnisberichte aus verschiedensten Messsystemen.
- Bereitstellung von Beispielcodes und Dokumentation zur PTB-internen Verwendung und als Open-source-Angebot für externe Nutzer.

Themenbereich 2:

Durchfluss

Bearbeitet in den Fachbereichen 1.4, 1.5 und 7.5

Aufgaben

Der Themenbereich *Durchfluss* befasst sich auf der Basis des Einheiten- und Zeitgesetzes mit der Darstellung und Weitergabe der Einheiten für die Strömungsmessgrößen Menge, Durchfluss und thermische Energiemessung von Flüssigkeiten sowie Menge, Durchfluss, Strömungsgeschwindigkeit, thermische Energiemessung und kalorische Größen von Gasen. Hierzu werden Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zum einen mit dem Ziel durchgeführt, sowohl Darstellungsbereich und die erreichte Darstellungsunsicherheit an die steigenden Anforderungen von Wissenschaft und Industrie anzupassen. Zum anderen adressieren umfangreiche Forschungsarbeiten zur Energieeffizienz wichtige politisch-ökonomische Herausforderungen der Energiewende. Aus dem Mess- und Eichgesetz ergeben sich darüber hinaus vielfältige Aufgaben zur Sicherung der Einheitlichkeit und Richtigkeit der Durchflussmessungen im gesetzlich geregelten Bereich. Im Einzelnen werden hierzu folgende Aufgaben bearbeitet:

1. Sicherung und Ausbau der internationalen Spitzenstellung bei der Darstellung der Einheiten für die Strömungsmessgrößen von Flüssigkeiten und Gasen.
2. Schaffung geschlossener Systeme der Rückführbarkeit der Gas- und Flüssigkeitsmessungen auf die entsprechenden nationalen Normale der PTB.
3. Sicherung der Einheitlichkeit und Richtigkeit aller Messverfahren für die oben genannten Einheiten, auch im Bereich erneuerbarer Energien (z. B. Bio- und synthetische Kraftstoffe, Biogase, Windenergie und Wasserstoff) und im Rahmen der Umsetzung des Gesetzes zur Digitalisierung der Energiewende, insbesondere für Belange des Verbraucher-, Umwelt- oder Gesundheitsschutzes; Schaffung international einheitlicher Vorschriften für die Konformitätsbewertung und Zertifizierung als Voraussetzung für die Anerkennung der entsprechenden Ergebnisse in Europa und weltweit.
4. Entwicklung von Verfahren zur Kalibrierung von Durchflussmessgeräten bei hohen Temperaturen und der Vor-Ort-Messung thermischer Energie mit geringsten Unsicherheiten in konventionellen (Kraft-Wärmekopplung) und solarthermischen Kraftwerken.

Geplante Arbeiten und Ziele

Zu 1.

- Ausbau der Qualitätssicherung und Reduzierung der Messunsicherheiten der Prüfstände zur Messung des Durchflusses strömender Flüssigkeiten; Arbeitsschwerpunkt insbesondere hinsichtlich des Einflusses dynamischer Messbe-

dingungen; Ausbau der metrologischen Infrastruktur für Durchflussmessungen im Bereich unter 10 L/h für Wasser und weitere Flüssigkeiten.

- Aufbau von Normalmesseinrichtungen zur Rückführung von Messgeräten für thermische Energie durch Normalmesanlagen für strömendes Wasser mit Durchflüssen von wenigen L/h bis zu 1000 m³/h im Temperaturbereich von 3 °C bis 230 °C.
- Aufbau und Inbetriebnahme einer neuen Primärrealisierung ($Q_{\max} = 1.600 \text{ m}^3/\text{h}$, $p_{\max} = 65 \text{ bar}$) für die Hochdruck-Erdgasmessung in einem Loop-Prüfstand.
- Verringerung der Messunsicherheiten von Durchflussmessgeräten für Gase und Flüssigkeiten in der gesamten Rückführungskette bis zur Verwendung unter Berücksichtigung des Einflusses von Temperatur, Druck, Gas- und Flüssigkeitsart, Strömungsprofil sowie Durchflussdynamik.

Zu 2.

- Weiterentwicklung der Primär- und der Sekundärnormale sowie Erweiterung der Prüf- und Messmöglichkeiten für Gasmessgeräte mit Luft auf Prüfdrücke bis 16 bar bei maximalen Masseströmen bis ca. 2000 kg/h.
- Optimierung der Charakterisierung von Transfernormalen für Flüssigkeiten mit dem Ziel einer verbesserten Weitergabe der Einheit „Durchfluss von strömenden Flüssigkeiten“ zum Endnutzer entsprechender Messgeräte.
- Entwicklung von metrologisch abgesicherten Rückführungsketten für die Mengen- und Durchflussmessung von erneuerbaren Gasen und Gasgemischen
- Schaffung einer metrologischen Infrastruktur zur realitätsnahen Charakterisierung des Messverhaltens von Durchfluss- und Volumenmessgeräten von Flüssigkeiten, Weiterentwicklung der messtechnischen Infrastruktur und Testverfahren auf Basis von Kavitationsdüsen.

Zu 3.

- Aufbau eines robusten Wind-LIDAR-Systems zur Bestimmung von Windgeschwindigkeitsvektoren bis in Höhen von 250 m auch bei schwierigen Geländebedingungen, um die Messung der Leistungskurven von Windenergieanlagen gemäß IEC-Norm 61400-12-1 auch für mobile Anlagen zu ermöglichen.
- Aufbau von Prüf- und Kalibriermöglichkeiten für die Messung von Wasserstoff sowie von Gemischen aus Erdgas und regenerativ erzeugten Gasen.

- Entwicklung thermodynamischer und kalorimetrischer Verfahren, die sich zur Untersuchung von Gasen sowie zur Untersuchung von Lithium-Ionen-Batterien einsetzen lassen.
- Entwicklung von Verfahren zur Evaluierung der Messrichtigkeit von Durchflussmessgeräten, die in der Kraftstoffverbrauchsmessung eingesetzt werden.
- Metrologische Begleitung zur Geräteentwicklung von digitalen, intelligenten Messsystemen (Smart Meters) sowie zu nicht-invasiven Messmethoden im Bereich der Messung strömender Flüssigkeiten.
- Aktualisierung und Erweiterung grundlegender Dokumente im Bereich der Gas-, Flüssigkeits- und Wärmemengenmessung zur Anpassung an den Stand der Technik sowie zur internationalen Vereinheitlichung der Anforderungen an entsprechende Messgeräte und -anlagen und nationalen Umsetzung der internationalen Vorschriften für die Anerkennung von Prüfergebnissen und Zertifikaten.

Zu 4.

- Durchführung von drittmittelfinanzierten Forschungsvorhaben zur nichtinvasiven laseroptischen und ultraschallbasierenden Vor-Ort-Durchflussmessung sowohl in konventionellen Kraftwerken mit Kraft-Wärmekopplung (Wärmeträgermedium Wasser) als auch solarthermischen Anlagen und Kraftwerken (Wärmeträgermedien Wasser-Glykol-Gemische, Thermo-Öle und Salzschnmelzen); die präzise Messung der Hauptsteuerungsgröße „thermische Energie“ erlaubt die Ermittlung der Energieeffizienz beim Betrieb dieser Kraftwerke.
- Aufbau einer neuartigen laseroptischen, auf der Rayleigh-Streuung beruhenden Ganzfeldmethode zur simultanen Messung der Geschwindigkeits- und Temperaturverteilung in strömenden thermischen Energieträgern.

Themenbereich 3:

Elektrizität und Magnetismus

Bearbeitet in den Fachbereichen 2.1 bis 2.6, 7.6

Aufgaben

Der Themenbereich *Elektrizität und Magnetismus* befasst sich gemäß dem aus dem Einheiten- und Zeitgesetz und dem Mess- und Eichgesetz abgeleiteten Auftrag mit der Darstellung, Bewahrung und Weitergabe der elektrischen und magnetischen Einheiten. Konkret werden folgende Aufgaben bearbeitet:

1. Forschung und Entwicklung zur Darstellung und Bewahrung der elektrischen Einheiten mithilfe von Verfahren der elektrischen Quantenmetrologie, Entwicklung von hochempfindlichen quantenbasierten elektrischen Messverfahren und Sensoren sowie Entwicklung von Messverfahren für Quantentechnologien.
2. Darstellung und Weitergabe der elektrischen und magnetischen Einheiten (ohne Energiemesstechnik) über erweiterte Wertebereiche unter möglichst direkter Nutzung von Quanteneffekten im gesamten Niederfrequenzbereich; Technologietransfer von elektrischen und magnetischen Messverfahren in die Industrie.
3. Darstellung und Weitergabe der Einheiten der elektrischen Energiemesstechnik (inklusive Hochspannungsmesstechnik) sowie Konformitätsbewertung und Prüfung von Messeinrichtungen für Elektrizität (inklusive Zusatzeinrichtungen).
4. Darstellung und Weitergabe der Einheiten der Hochfrequenz-, Feld- und Antennenmesstechnik über erweiterte Frequenzbereiche sowie Forschung und Entwicklung von Messverfahren zur Charakterisierung von analogen und digitalen Hochfrequenzsystemen.

5. Forschung und Entwicklung von Messverfahren für nanomagnetische Strukturen und Systeme sowie Rückführung der Messung nanomagnetischer Kenngrößen.

Geplante Arbeiten und Ziele

Zu 1.

- Optimierung von integrierten Quantenschaltungen aus Halbleiter-Einzelelektronenquellen und breitbandigen Einzelelektronen-Detektoren (RF-SET-Detektoren) für den Schluss des quantenmetrologischen Dreiecks mit einer Unsicherheit besser 10^{-6} zur Untermauerung der Konsistenz der elektrischen Quantenmetrologie.
- Entwicklung quantenlimitierter, supraleitender Verstärker für elektro-magnetische Signale, Herstellung und Integration supraleitender Qubits und Entwicklung von Methoden zur Qubit-Charakterisierung.
- Entwicklung von in-situ-elektrooptischen Abtastverfahren für Mikrowellen-Ansteuersignale von supraleitenden (Quanten-)Computern.
- Entwicklung und Herstellung von SQUID-Stromsensoren auf der Basis von Niob und Aluminium mit erhöhter Integrationsdichte und Sub-Mikrometer-Josephson-Kontakten für Magnetometrie in Ultra-Niedrigfeld-Umgebung und für Untersuchungen an Quantenwiderständen.

Zu 2.

- Erhöhung der Ausgangsspannung und Verringerung der Komplexität von pulsgetriebenen Josephson-Spannungsnormale mithilfe von neuen hybriden elektrischen oder optoelektronischen Ansteuermethoden zum Ausbau der quantenbasierten, selbstreferenzierten Wechselspannungsmesstechnik.
- Entwicklung, Validierung und Technologietransfer in die Industrie von selbstreferenzierten Wechselspannungsmessverfahren, basierend auf pulsgetriebenen Josephson-Spannungsnormale.
- Entwicklung eines langzeitstabilen, für den Betrieb in Kleinkühlern geeigneten Graphen-basierten Quanten-Hall-Normale für den Widerstand (Gleichstrombetrieb) und die Impedanz (Wechselstrombetrieb) sowie Untersuchungen zum quantisierten anomalen Hall-Effekt.
- Optimierung und Frequenzerweiterung (50 Hz bis 50 kHz) von 4-Tor-Impedanzmessbrücken basierend auf pulsgetriebenen Josephson-Spannungsnormale und Graphen-Quanten-Hall-Impedanznormale als automatisierte universelle Normale für Impedanzverhältnisse.
- Vor-Ort-Vergleiche von quantenbasierten Wechselspannungsvoltmetern basierend auf binären Josephson-Spannungsnormale.

Zu 3.

- Entwicklung von Kalibrierangeboten zur Charakterisierung analoger und digitaler breitbandiger Strom- und Spannungswandler (Strom- und Spannungssensoren) und digitaler Elektrizitätszähler zur Rückführung von Messungen in verteilten Echtzeitmesssystemen in Übertragungs- und Verteilnetzen.
- Modernisierung und Ausbau der Hochspannungsmesstechnik für Gleich-, Wechsel- und transiente Hochspannungen sowie für Mischspannungen zur metrologischen Unterstützung der Betriebssicherheit des elektrischen Versorgungsnetzes.
- Aufbau eines breitbandigen Normale für die elektrische Leistung bei nichtsinusförmigen Signalen sowie Charakterisierung realer Systeme der Leistungselektronik, um der durch den Anschluss regenerativer Energiequellen, Speichern und Ladesäulen an das öffentliche Versorgungsnetz verminderter Netzqualität Rechnung zu tragen.
- Entwicklung einer mobilen Prüfeinrichtung für Wechselstrom- und Gleichstromladeeinrichtungen der Elektromobilität und Mitwirkung an der Erarbeitung der Standardisierungsstrategie für Smart Meter Gateways.
- Erstellung eines Messkonzeptes zur Mehrfachnutzung von Speichersystemen und Erzeugungsanlagen in Mehrfamilienhäusern zur Unterstützung der Netzintegration erneuerbarer Energien und Speicher.

Zu 4.

- Entwicklung optimierter Feldgeneratoren zur Darstellung und Weitergabe der elektrischen Feldstärke sowie zur Untersuchung der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) und Entwicklung international anerkannter Antennenkalibrierdienstleistungen im Frequenzbereich von 1 bis 500 GHz sowie Nutzung der Vor-Ort-Antennenmesstechnik, u. a. zur Bestimmung der Störwirkung von Windkraftanlagen.
- Darstellung und Weitergabe der Hochfrequenz-Basisgrößen, wie z. B. Leistung und Streuparameter bei höheren Frequenzen (teilweise bis zu 500 GHz), gemäß dem Rückführungsbedarf der Industrie.
- Entwicklung von Rückführungsmöglichkeiten für Hochfrequenzmessgrößen der digitalen Kommunikation, z. B. in den Bereichen passive Intermodulation (PIM), Phasenrauschen, frequenzumsetzende Messungen, Signal- und Systemkenngrößen (z. B. Error-Vector-Magnitude, 5G-Antennenparameter, Bit-Error-Ratio) und Kanalkenngrößen (Channel Sounding).
- Untersuchung und Entwicklung von rückgeführten Streuparameter-Messungen in planaren Geometrien bis 170 GHz mit industrietauglichen Substratmaterialien und Prüfspitzen.
- Weiterentwicklung elektrooptischer auf Femtosekundenlaser-Messtechnik basierender Verfahren für die Wellenformmetrologie.

Zu 5.

- Abschluss des Technologietransfers rückgeführter ortsaufgelöster Magnetfeldmesstechnik basierend auf magnetischer Kraftmikroskopie für den Submikrometerbereich.
- Untersuchung und Entwicklung der quantenbasierten Rückführung ortsaufgelöster, nanoskaliger Magnetfeldmessungen mithilfe der NV-Zentren-Magnetometrie.

Themenbereich 4:

Ionisierende Strahlung

Bearbeitet in den Fachbereichen 6.1 bis 6.4, 7.2, 7.6

Aufgaben

In diesem Themenbereich werden gemäß Einheiten- und Zeitgesetz, Strahlenschutzgesetz, Strahlenschutzverordnung, Mess- und Eichgesetz, Mess- und Eichverordnung, IMIS-Zuständigkeitsverordnung, Atomgesetz sowie Medizinproduktegesetz und Medizinprodukte-Betreiberverordnung metrologische Aufgaben sowie Zulassungen und Konformitätsbewertungen wahrgenommen. So wird die Grundlage für Vertrauen in korrekte Messungen und deren Interpretation in diesem gesellschaftlich mitunter kontrovers diskutierten Bereich gesichert. Zusätzlich werden die Infrastruktur und die Kompetenz der PTB für häufig drittmittelfinanzierte Projekte eingesetzt, um im Rahmen von nationalen und internationalen Kooperationen einen Beitrag zum Fortschritt in der Metrologie, der Wirtschaft und der Wissenschaft zu leisten.

1. Einheiten: Darstellung und Weitergabe der SI-Einheiten der Aktivität, der Teilchenfluenz, der Luftkerma, der Wasser-Energiedosis und der Äquivalentdosis; Forschung und Entwicklung für neue und verbesserte Primär- und Sekundärnormale sowie für Referenzfelder.
2. Messverfahren: Weiterentwicklung der Referenzstrahlungsfelder, der messtechnischen Infrastruktur und spezieller Detektoren; Entwicklung von Messverfahren für die Radioaktivität, die Dosimetrie in Röntgendiagnostik, Strahlentherapie, Strahlenschutz und Notfallschutz. Entwicklung von neuen metrologischen Methoden in der Umweltmesstechnik sowie Quantifizierung der Wirksamkeit der ionisierenden Strahlung.
3. Gesetzliche Aufgaben: Baumusterprüfung von Orts-, Personen- und Diagnostikdosimetern für Photonenstrahlung, Bauartprüfung und Bauartzulassung von Röntgenstrahlern und Röntgeneinrichtungen, Betrieb der IMIS-Spurenmessstelle, Bereitstellung von Radioaktivitätsstandards für Vergleichsmessungen. Bereitstellung von Referenzmessfelder zur Messung der Gamma-Ortsdosisleistung der Umgebungsstrahlung, Qualitätssicherung der amtlichen Dosimetrie nach Strahlenschutzgesetz und nach Mess- und Eichverordnung, Unabhängige Überwachungsstelle für die messtechnische Kontrolle nach Medizinproduktegesetz/ Medizinprodukte-Betreiberverordnung.
4. Grundlagen der Metrologie: Bestimmung und Evaluation von Kern- und Atomdaten als Basisdaten für metrologische Anwendungen (z. B. für Monte-Carlo-Modellrechnungen, zur Berechnung von Korrekturfaktoren für die Darstellung der Einheiten und des Ansprechvermögens von Normalmess-einrichtungen sowie zur Bestimmung der Eigenschaften von Referenzfeldern), für Anwendungen in der Energieerzeugung und in der allgemeinen Grundlagenforschung (z. B. nukleare Astrophysik, Atom- und Kernphysik).

5. Politikberatung, Gremienarbeit und Qualitätssicherung: Beratung von Ministerien, Bundesbehörden und Landesbehörden. Nationale und internationale Messvergleiche, Mitarbeit in nationalen und internationalen Gremien zur Harmonisierung auf dem Gebiet der Metrologie ionisierender Strahlung.

Geplante Arbeiten und Ziele

Zu 1.

- Weiterentwicklung von zwei Normal-Messeinrichtungen für Radionuklide, die in der Nuklearmedizin Verwendung finden oder deren Einsatz geplant ist, z. B. ^{11}C , ^{13}N , ^{15}O , $^{68}\text{Ge}/^{68}\text{Ga}$.
- Entwicklung von Radon-Emanationsquellen zur Darstellung und Weitergabe der Aktivitätseinheit für ^{222}Rn und ^{220}Rn bei kleinen Aktivitäten.
- Entwicklung massenspektrometrischer Methoden und radiochemischer Analyseverfahren für die Radionuklidanalyse zur Bestimmung der Aktivität.
- Entwicklung von Sekundärnormalen für die Umgebungs-, Richtungs- und Personen-Äquivalentdosis, $H^*(10)$, $H'(0,07)$, $H'(3)$ und $H_p(3)$, für Photonen- und Elektronenstrahlung.
- Darstellung der Wasser-Energiedosis für verschiedenste Anwendungen, einschließlich hochenergetischer Photonen-Strahlungsfelder von Hybridgeräten bestehend aus der Kombination von MRT und klinischem Linearbeschleuniger (MR-Linac) und therapeutisch genutzten Photonenstrahlungsfeldern von Miniatur-Röntgenröhren und Beschleunigern (elektronische Brachytherapie).
- Weiterentwicklung von Spektrosimetern zu einem neuen Transfornormal für die Dosimetrie bei niedrigen Dosisleistungen.
- Durchführung von und Teilnahme an BIPM-Schlüsselvergleichen und an Vergleichen im Rahmen von EURAMET und COOMET für die Messgrößen Aktivität, Luftkerma, Wasser-Energiedosis, Äquivalentdosis und Fluenz.

Zu 2.

- Entwicklung von datengetriebenen Analyseverfahren in der Spektrometrie im Rahmen der Digitalisierung und zur Entwicklung von digitalen Services.
- Entwicklung von dosimetrischen Methoden für die MR-geführte Strahlentherapie für die Therapie mit kleinen Strahlenbündeln, die FLASH-Therapie, für die elektronische Brachytherapie, die Hadronentherapie sowie die Computertomografie.

- Bereitstellung von Verfahren zur Bestimmung der Bildqualität in Abhängigkeit von der Dosis im Bereich der Röntgendiagnostik, zunehmend unter Einsatz neuer KI-gestützter Methoden.
- Entwicklung von Prozeduren für die personalisierte Dosimetrie in der Röntgendiagnostik, u.a. mittels Methoden der künstlichen Intelligenz.
- Prototypen-Entwicklung eines für gepulste Photonenstrahlung geeigneten Dosimeters auf Basis von Pixel-Detektoren.
- Entwicklung eines Neutronenmonitors für das Fusionsexperiment Wendelstein 7X (IPP Greifswald) und von Neutronenspektrometern für die Plasmadiagnostik (u. a. für ITER).
- Aufbau eines Referenzfeldes für gepulste, hochenergetische (Photonen-)Strahlung mit typischen Dosisleistungen hinter der Abschirmung von Beschleunigeranlagen.
- Entwicklung von Ferndetektionsverfahren für den Notfallenschutz: Entwicklung optischer Methoden zur Detektion von Alphateilchen und Weiterentwicklung des Einsatzes von unbemannt fliegenden Systemen zur radiologischen Überwachung in der Umwelt.
- Entwicklung der metrologischen Infrastruktur für den Einsatz der Radonmetrologie in der Klimabeobachtung und im Strahlenschutz.
- Entwicklung von metrologisch validierten Verfahren zur Messung der Bodenfeuchte auf multiplen Längenskalen.
- Entwicklung neuer metrologischer Methoden und Messinfrastruktur zur Untersuchung der Auswirkungen der kosmischen Strahlung auf die Erdbiosphäre.
- Charakterisierung von komplexen hochenergetischen Strahlungsfeldern.
- Entwicklung eines hochenergetischen Neutronenreferenzfeldes an der Beschleunigeranlage TLabs in Südafrika zusammen mit anderen europäischen Metrologieinstituten.
- Charakterisierung eines hochintensiven Neutronenfeldes für dosimetrische und technische Anwendungen.
- Charakterisierung des thermischen Neutronenreferenzfeldes unter Verwendung von Monte-Carlo-Methoden.
- Entwicklung von Echtzeit-Verfahren für die Online-Strahlenschutzdosimetrie.
- Weiterentwicklung von Verfahren der MMC-Datenanalyse und von Kalibriermethoden für MMC-Spektrometrie.
- Entwicklung von Verfahren zur Qualitätssicherung von Monte-Carlo-Simulationsprogrammen und zur Unsicherheitsanalyse der Simulationsergebnisse.
- Untersuchung der biologischen Wirksamkeit ionisierender Strahlung, z. B. durch gezielte Zellbestrahlung mit Ionen.
- Experimentelle Bestimmung von Halbwertszeiten langlebiger Radionuklide für geo- und kosmologische Datierungsmethoden wie z. B. ^{40}K , ^{32}Si , ^{137}La und ^{157}Tb .
- Bestimmung von Wirkungsquerschnitten für neutroneninduzierte Reaktionen für Neutronenenergien > 20 MeV.
- Bestimmung des Massenstoß-Bremsvermögens von Elektronen in für die Dosimetrie wichtigen Materialien, z. B. Graphit.
- Messung der I-Werte und Elektronenwechselwirkungsquerschnitte von Humangewebe.

Zu 5.

- Mitwirkung an der Gestaltung der Strahlenschutzgesetzgebung und des Vollzugs in Deutschland durch Beratung, soweit die PTB in diesem Zusammenhang beauftragt ist oder ihre technische Expertise benötigt wird.
- Messvergleiche mit Orts- und Personendosimetern der nationalen und internationalen Dosimetrie-Messstellen für Photonen-, Beta- und Neutronenstrahlung.
- Messvergleiche der Betreiber kerntechnischer Anlagen und der IMIS-Leitstellen für die Messgrößen Aktivität und Aktivitätskonzentration.

Zu 3.

- Regel- und gesetzkonforme Durchführung aller Zulassungen, Prüfungen und Konformitätsbewertungen.
- Qualitätssicherung für die Neutronen- und Betadosimetrie, z. B. über Kalibrierungen und Bestrahlungen.
- Neuordnung der Bauartprüfung und Bauartzulassung von Röntgenstrahlern und Röntgeneinrichtungen im Rahmen der Umsetzung der Richtlinie 2013/59/EURATOM in nationales Recht.

Zu 4.

- Messung fundamentaler Nuklidatome sowie Entwicklung primärer Methoden für Zerfallsschema-unabhängige Aktivitätsbestimmungen mittels Spektrometrie basierend auf Metallischen Magnetischen Kalorimetern (MMC).

Themenbereich 5:

Länge, dimensionelle Metrologie

Bearbeitet in den Fachbereichen 4.2, 4.3, 5.1 bis 5.5, 7.1, 7.2 und 8.4

Aufgaben

Der Themenbereich *Länge und dimensionelle Metrologie* behandelt die sich aus dem gesetzlichen Auftrag gemäß dem Einheiten- und Zeitgesetz, dem Mess- und Eichgesetz und der Europäischen Messgeräte-Richtlinie (MID) 2014/32/EU zur Darstellung, Bewahrung und Weitergabe der SI-Einheit der Länge, Meter, sowie den daraus abgeleiteten dimensionellen Messgrößen ergebenden Aufgaben:

1. Entwicklung und Bereitstellung frequenzstabilisierter Laser als nationale Normale oder als sekundäre Frequenznormale, die in optischen Interferenzkomparatoren und Interferometern zur Darstellung und Weitergabe der SI-Einheit Länge verwendet werden. Entwicklung von Verfahren zum direkten Anschluss frequenzstabilisierter Laser über Frequenzkämme an die Atomuhren der PTB als primäres Normal.
2. Weiterentwicklung der interferentiellen Messtechnik zur Darstellung der Länge prismatischer Körper und des Volumens von Kugeln sowie für die geodätische Längenmesstechnik.
3. Entwicklung und Anwendung von Messverfahren an Längen- und Winkelteilungen, die zur Weitergabe der Längeneinheit sowie von Winkelmessgrößen genutzt werden.
4. Entwicklung und Anwendung von Messverfahren zur Weitergabe dimensioneller Messgrößen an Oberflächen in verschiedenen Skalenbereichen sowie an Oberflächenschichten.
5. Entwicklung und Anwendung von Messverfahren zur Weitergabe dimensioneller Messgrößen an Komponenten und Systemen mit Abmessungen ≤ 1 mm und oftmals hohen Aspektverhältnissen.
6. Entwicklung und Anwendung von Messverfahren zur Weitergabe dimensioneller Messgrößen an makroskopischen Messobjekten mit Abmessungen von Zentimetern bis zu einigen 10 Metern.
7. Entwicklung und Anwendung von Verfahren zur rückführbaren Charakterisierung von Material- und Systemeigenschaften unter Einsatz dimensioneller Messverfahren.

Geplante Arbeiten und Ziele

Zu 1.

- Entwicklung und Bereitstellung stabilisierter Laserstrahlung im sichtbaren und infraroten Spektralbereich.
- Weiterentwicklung der Signalverarbeitung an Frequenzkämmen zur Optimierung der Zuverlässigkeit und Langzeitverfügbarkeit.

Zu 2.

- Optimierung der Fizeau-Kugelinterferometer 1 und 2 im Zusammenhang mit der Messung des Volumens von ^{28}Si -Kugeln für die Darstellung der Masse.
- Entwicklung von Interferometern zur Messung von Topografien an kleinen Kugeln (5 mm – 30 mm) für den Einsatz in der Koordinatenmesstechnik; Weiterführung von Grundlagenuntersuchungen zum Phasensprung und Konzeption einer Messeinrichtung für eine genauere Bestimmung der Phasensprungkorrektur.
- Adaption eines Fizeau-Kugelinterferometers für vergleichende Messung von kleinen Kugeln sowie für die Kalibrierung sphärischer Referenzflächen für die Optikindustrie.
- Bestimmung der Luftbrechzahl im Ultrapräzisionsinterferometer im nahen Infrarotbereich als Grundlage für eine rückführbare interferometrische Längenmesstechnik, die entsprechende Lichtquellen nutzt, u. a. Wellenlängen im Telekom-Bereich von ca. 1,5 μm .
- Neuentwicklungen zur Verringerung der Messunsicherheit bei der Kalibrierung von Laserinterferometersystemen für die Fertigungsmesstechnik, Weiterentwicklung der fs-Frequenzkamm-basierten Längenmessverfahren und 3D-fähiger Interferometrie. Entwicklung und Aufbau einer Messeinrichtung zur Kalibrierung von Triangulationssensoren.
- Anwendungsorientierte Weiterentwicklung brechzahlkompensierender Absolutinterferometrie in 1D und 3D für die Rückführung geodätischer Messtechnik und Referenzrahmen.

Zu 3.

- Neubestimmung des Gitterparameters an angereichertem ^{28}Si mittels Kombination von optischer und Röntgen-Interferometrie mit einer angestrebten relativen Messunsicherheit von kleiner 3×10^{-9} sowie Durchführung von Relativmessungen des Gitterparameters von ^{28}Si -Kristallproben durch Vergleich mit einem Referenzkristall.
- Entwicklung eines vakuumbasierten Interferometer-Messplatzes zur ultrapräzisen Untersuchung von Längenmesssystemen und zu Grundlagen der Interferometrie sowie zur Bestimmung des Gitterparameters auf Basis von ^{28}Si -Kristallen mit atomar glatten Oberflächen.
- Entwicklung und Integration eines 6DoF-Heterodyninterferometer in ein UHV-STM.
- Weiterentwicklung des Nanometerkomparators zu einem Referenzmessgerät für Positionen und Geradheiten von Teilungen auf 1D- und 2D-Normalen, u. a. auch Stufenendmaßen.

- Charakterisierung und Weiterentwicklung elektronischer Autokollimatoren zum Einsatz in der Deflektometrie, u. a. durch Untersuchungen zu Abstandsabhängigkeiten.
- Entwicklung von Sensorik zur simultanen Messung von Länge und Winkel.

Zu 4.

- Optimierung von Methoden zur Präparation atomar glatter und monoatomar gestufter Silizium-Oberflächen für Anwendungen in der Oberflächenmesstechnik gemäß CCLGD-MeP-3.
- Anwendung und Weitergabe von Messmethoden und Validierung von Normalen zur Bestimmung des Radius taktiler Tastspitzen mit Spitzenradien von 5 µm bis 100 nm.
- Weiterentwicklung von taktiler, optischer und AFM-basierter Messtechnik und von Normalen für profil- und flächenbasierte Rauheitskenngrößen, auch an komplexen Funktionsflächen.
- Entwicklung eines Virtuellen Konfokalmikroskops für die Messung von Oberflächenstrukturen.
- Weiterentwicklung der Referenzsoftware für die Berechnung der wesentlichen profilhaften Rauheitskenngrößen und Implementierung von genormten profilhaften Filterverfahren. Integration von Referenzdatensätzen zur Validierung von profilhafter Rauheitssoftware in TraCIM.
- Weiterentwicklung der für metrologische Aufgaben zugeschnittenen Software für die Berechnung der wesentlichen genormten flächenhaften Rauheitskenngrößen und Implementierung von genormten flächenhaften Filterverfahren.
- Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zur ultrapräzisen Planflächenmessung (Ringvergleich).
- Entwicklung von Radiusmessungen an Kugelsegmenten; Messung optischer Wellenfronten.
- Entwicklung einer rückgeführten optischen Messtechnik zur Bestimmung der Form von optisch glatten Flächen wie z. B. Asphären und Freiformflächen (Abmessungen bis zu 1,5 m) sowie Entwicklung von Normalen zur Überprüfung von Messsystemen für die Asphären- und Freiformmetrologie.
- Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zur bidirektionalen Messung von Oberflächenstrukturen bis in den Sub-µm-Bereich für die industrielle Messtechnik, optische KMGs und die quantitative Mikroskopie.
- Entwicklung und Untersuchung von Interferometern mit verschränkten Photonen zur Quanten-Kohärenztomografie in komplexen (Schicht)-Systemen: Aufbau einer gepulsten breitbandigen Quelle verschränkter Photonen, Implementierung von Hong-Ou-Mandel-Interferometern im Zeit- und Frequenzbereich, Entwicklung von Methoden zur Charakterisierung der Auflösung und des Rauschens der Quanten-Kohärenztomografie.

Zu 5.

- Entwicklung von Sensoren für die Messtechnik an Mikrostrukturen mit hohem Aspektverhältnis zur Erfassung kleiner 3D-Strukturen mit Durchmessern $\geq 50 \mu\text{m}$.

- Entwicklung von Mikroprüfkörpern für die Spezifikation von Mikro-KMG.
- Entwicklung von Methoden zur Handhabung, Reinigung und Messung von Mikrobauteilen.
- Entwicklung von licht- und elektronenmikroskopischen sowie CT-Methoden für Mikrostrukturmessungen.
- Aufbau und Erprobung neuer Verfahren für form- und stoffschlüssiges Verbinden von Mikrokomponenten. Fertigung von Normalen für die Mikro- und Nanometrologie.

Zu 6.

- Arbeiten zur messtechnischen Rückführung funktionsrelevanter Parameter großer Bauteile (Durchmesser bis zu 4 m), u. a. im Rahmen des Kompetenzzentrums für Windenergie.
- Erweiterung des Onlineservices TraCIM zur Validierung von Auswertelgorithmen für die Koordinatenmesstechnik, auch für KI-basierte Algorithmen im Fertigungsumfeld.
- Validierung und Einsatz des neuen nationalen Normalen für die Kalibrierung von Längen und Durchmessern (KOLD).
- Forschungsarbeiten zur dimensionellen Messung mit optischen Sensoren bzw. optischen Messsystemen sowie deren Rückführung.
- Verbesserung der Geometriefehlerbestimmung an hochgenauen Koordinatenmessgeräten und Groß-Koordinatenmessgeräten.
- Forschungsarbeiten zur Bestimmung und Verringerung der Messunsicherheit bei industrieller Röntgen-Computertomografie (CT), auch für additiv gefertigte Komponenten.
- KI-gestützte Datenkompression in der industriellen Röntgen-Computertomografie.
- Entwicklung einer digitalen Qualitätsinfrastruktur für die Fertigungsmesstechnik.
- Weiterentwicklung des Virtuellen Messgerätes für weitere Messaufgaben im Bereich der Koordinaten-, Verzahnungs- und Röntgen-CT-Messtechnik.
- Entwicklung einer weitestgehend automatisierten Parametrisierung sowie Messergebnisausgabe beim VCMM über digitale Kalibrierscheine.
- Erweiterung der Referenzwand zur Überprüfung von photogrammetrischen Messsystemen.
- Entwicklung und Transfer ganzheitlicher Mess- und Auswertestrategien.

Zu 7.

- Messverfahren für die Geometriebestimmung von Eindringkörpern in der Härtemesstechnik.
- Weiterentwicklung von Mikrotastern für schnelle Rauheits- und Elastizitätsmessungen.
- Weiterentwicklung von MEMS-Sensoren für nanoelektromechanische Messungen an Nanostrukturen und Nano-drähten (NanoWires).
- Weiterentwicklung von Messverfahren zur Bestimmung der thermischen Ausdehnung von Probekörpern und zur Charakterisierung von Längen (und Längeninstabilitäten) in komplexen Anordnungen.

- Weiterentwicklung von Verfahren zur rückgeführten Charakterisierung der Modulationstransferfunktion (MTF) abbildender Objektive.
- Entwicklung von Methoden zur Charakterisierung der Auflösung und des Rauschens der Quanten-Kohärenztomographie.

Zu 8.

- Aufbau einer gepulsten breitbandigen Quelle verschränkter Photonen
- Implementierung von Hong-Ou-Mandel-Interferometern im Zeit- und Frequenzbereich

Themenbereich 6:

Masse und abgeleitete Größen

Bearbeitet in den Fachbereichen 1.1, 1.2, 1.3, 1.7, 1.8, 3.3, 4.2, 5.1, 7.2, 7.5

Aufgaben

Im Themenbereich *Masse und abgeleitete Größen* wird – basierend auf dem Einheiten- und Zeitgesetz, dem Mess- und Eichgesetz sowie der europäischen Messgeräte-richtlinie (MID) und der Richtlinie für nicht-selbsttätige Waagen (NAWID) – an der Darstellung und Weitergabe der mechanischen Einheiten für Masse, Festkörperdichte, Kraft, Drehmoment, Härte und Druck (auch Vakuumdruck) sowie an Dienstleistungen im Auftrag der Konformitätsbewertungsstelle der PTB gearbeitet. Der Bereich zeichnet sich durch fundamentale Forschung im Rahmen der Realisierung von Einheiten einerseits und große Industrienähe andererseits aus. Das spiegelt sich in der sehr hohen Anzahl von Kalibrier-, Prüf- und Konformitätsbewertungszertifikaten sowie Veröffentlichungen der beteiligten Fachbereiche wider. Um die derzeitigen und künftigen Anforderungen aus Industrie, Wissenschaft und Forschung an genaue Messungen zu erfüllen, werden folgende Aufgaben bearbeitet:

1. Arbeiten zur Realisierung, Bewahrung und Weitergabe der Definition der Masseneinheit Kilogramm.
2. Aufgaben zur Realisierung, Bewahrung und Weitergabe der Einheiten der Dichte von Festkörpern
3. Aufbau, Inbetriebnahme und Erprobung von Normalmess-einrichtungen (NME) zur Messung großer Drehmomente im Rahmen der Einrichtung eines Kompetenzzentrums für Windenergie; Ausbau und Weiterentwicklung der NME für statische Kräfte von 1 N bis 16,5 MN und Drehmomente von 1 mN · m bis 5 MN · m; Realisierung von NME für kleine Kräfte im Bereich 100 µN bis 1 N; Erweiterung der NME auf Mehrkomponenten (Kraft und Moment); Erweiterung der Messverfahren auf große Kräfte bis 50 MN.
4. Realisierung bzw. Erweiterung von NME für dynamische Kräfte und Drehmomente, u. a. für sinusförmige Kräfte bis 100 kN und stoßförmige Kräfte bis 250 kN.

5. Sicherung der Druckskala bis 1,6 GPa; Entwicklung von Druck-Primärnormalen mit Unsicherheiten von kleiner 5 mPa + $1,5 \times 10^{-5} \times p$ für Absolut- und Überdrücke unterhalb von 15 kPa.
6. Eine neue Realisierung der Einheit Pascal in der Vakuummetrologie durch eine optische Methode und eine Verbesserung der statischen Expansionsmethode sowie die Rückführung von Ausgasratenmessungen auf das SI. Die Weitergabe der Skala im Hochvakuum soll durch ein neuartiges Ionisationsvakuummeter verbessert werden.
7. Konformitätsbewertungen von nicht-selbsttätigen und selbsttätigen Waagen sowie von deren Modulen auf der Grundlage nationaler, europäischer und internationaler Vorgaben im Auftrag der Konformitätsbewertungsstelle KBS der PTB.
8. Erstellung und Weiterentwicklung zugrundeliegender Normen und normativer Dokumente, u. a. im Rahmen der Digitalisierungsaktivitäten in der Metrologie.
9. Aufgaben zur Realisierung, Bewahrung und Weitergabe der Einheiten der Härte.

Geplante Arbeiten und Ziele

Zu 1.

- Charakterisierung weiterer Kugeln aus isotonenangereicherem Silizium, insbesondere die Bestimmung der Masse der Kugeln und ihrer Oberflächenschichten und darauf aufbauend Untersuchungen zur Stabilität der primären Massenormale. Teilnahme an „CIPM Key Comparisons“ der Realisierungen des neuen Kilogramms für die Beantragung und Aufrechterhaltung von international akzeptierten „Calibration and Measurement Capabilities“ (CMCs) und zur Festle-

gung eines Konsenswertes, der für die international koordinierte Weitergabe des Kilogramms in einer Übergangsphase nach der Neudefinition verwendet werden soll. Koordination der erforderlichen Messungen zur „Erneuerung“ der Realisierung des Kilogramms mit der XRCD-Methode in der PTB.

- Aufbau und Charakterisierung einer wägetechnischen Lösung (Planck-Waage basierend auf dem Kibble-Prinzip) zur Realisierung und Weitergabe der Masseneinheit für den Einsatz in Kalibrierlaboratorien inklusive der Erstellung eines „digitalen Zwillings“ der Messeinrichtung.

Zu 2.

- Koordinierung und Auswertung von Experimenten zur primären Realisierung der Dichteinheit auf der Basis der XRCD-Methode (Charakterisierung von Kugeln aus isotopenangereichertem Silizium). Aufklärung möglicher Diskrepanzen, auch mithilfe von Dichte-Differenzmessungen nach der Druckflotationsmethode.
- Aufbau und Weiterentwicklung von Apparaturen zur Weitergabe der Dichteinheiten auf höchstem Niveau durch unmittelbaren Vergleich mit primären Dichtenormalen. Insbesondere Forschung zur Entwicklung einer neuen hydrostatischen Dichtemessapparatur für den Vergleich von 1-kg- Kugeln aus natürlichem Silizium mit Kugeln aus isotopenangereichertem Silizium (^{28}Si).

Zu 3.

- Aufbau und Erprobung einer NME für Drehmomente bis $5 \text{ MN} \cdot \text{m}$ mit relativen Unsicherheiten von kleiner 5×10^{-3} für Komponenten von Windkraftanlagen und Erweiterung des Messbereichs für Drehmomente bis $20 \text{ MN} \cdot \text{m}$.
- Untersuchung systematischer Einflussgrößen wie Temperatur, Kräfteinleitungen und Stabilität an TransfERNormalen für Kräfte bis 2 MN , mit dem Ziel der Absicherung einer relativen Messunsicherheit von 1×10^{-5} .
- Entwicklung digitaler Zwillinge für Kraft- und Drehmomentsensoren.
- Aufbau einer Rückführungskette für Kräfte und Drehmomente in den Bereichen $100 \mu\text{N}$ bis 1 N bzw. $1 \text{ mN} \cdot \text{m}$ bis $1 \text{ N} \cdot \text{m}$ mit relativen Messunsicherheiten von kleiner 1×10^{-3} .
- Aufbau und Erweiterung der Rückführungskette für Kräfte von $16,5 \text{ MN}$ bis 50 MN mit relativen Messunsicherheiten von kleiner 5×10^{-4} und für Drehmomente von $1 \text{ MN} \cdot \text{m}$ bis $5 \text{ MN} \cdot \text{m}$ mit relativen Messunsicherheiten von kleiner 5×10^{-3} .

Zu 4.

- Rückführung von Kraftaufnehmern für dynamische Kraftmessungen bis 100 kN bei Frequenzen bis 1 kHz und bis 100 kN bei Frequenzen bis 100 Hz .
- Entwicklung von Verfahren zur messtechnischen Rückführung und Weitergabe von kontinuierlichen und dynamischen Kräften.

- Entwicklung von Kalibrierverfahren zur dynamischen Primärkalibrierung von Kraftaufnehmern und Modalhämern mit stoßförmiger Anregung.
- Aufbau von Normal-Messeinrichtungen zur dynamischen Kalibrierung von Drehmomentenaufnehmern mit sinusförmiger Belastung.

Zu 5.

- Durchführung von internationalen Vergleichsmessungen zum Nachweis der Kalibrierfähigkeit und Erweiterung der CMC-Einträge im Höchstdruckbereich bis $1,6 \text{ GPa}$.
- Entwicklung eines interferometrischen Öl-Mikromanometers für Absolut- und Überdrücke bis 2 kPa mit einer Unsicherheit von $1 \text{ mPa} + 2 \times 10^{-5} \times p$.
- Charakterisierung von kraftkompensierten Kolbenmanometern als Primärnormale für Absolut- und Überdrücke bis 15 kPa mit einer Unsicherheit von $5 \text{ mPa} + 1,5 \times 10^{-5} \times p$. Durchführung eines EURAMET-Schlüsselvergleichs zum Nachweis und der Registrierung der verbesserten Kalibrierfähigkeit.
- Betrieb und Weiterentwicklung von Apparaturen zur Rückführung des dynamischen Drucks bis zu Amplituden von mehreren hundert MPa.

Zu 6.

- Neurealisierung des Pascal durch die Entwicklung eines optischen Vakuumnormals, welches auf der Brechzahlmessung in einem optischen Resonator basiert.
- Entwicklung einer Referenzausgasungsquelle und deren Kalibrierung mit einer fundamentalen Methode. Die Ausgasung der Si-Kugel (XRCD-Methode) im Vakuum wird untersucht.
- Entwicklung und Testung eines neuartigen Ionisationsvakuummeters.

Zu 7.

- Umsetzung des „Digitalen Workflows“ vom Auftragseingang bis zur Erteilung des (digitalen) Zertifikats im Bereich der Konformitätsbewertung von Waagen und Modulen von Waagen.

Zu 8.

- Revision grundlegender Normen und internationaler Empfehlungen der OIML als Grundlage der Kalibrierung und Konformitätsbewertung von Messgeräten.
- Anpassung digitaler Kalibrierscheine auf der Basis des international veröffentlichten Modells des „DCC“ an die Bedürfnisse der jeweiligen Community (z.Z. Masse, Festkörperdichte, Waagen, Kraft und Drehmoment) und exemplarische Einbeziehung möglicher Transfer-Werkzeuge (z. B. „Metrology Cloud“).

- Entwicklung der Grundlagen für digitale Konformitätsbescheinigungen im Rahmen europäischer Richtlinien für Messgeräte (MID und NAWID) „D-CoC M“ auch hier unter Berücksichtigung möglicher Transfer-Werkzeuge.

Zu 9.

- Taktile Untersuchungen zur Größenbestimmung von Härteeindrücken. Definition des Kontaktpunktes von Eindringkörper und Probe für die Brinell-, Vickers- und Knoop-Härtebestimmung.
- Bestimmung der Veränderung der Eindruckgröße unter unterschiedlichen optischen Bedingungen.

Themenbereich 7:

Metrologie in der Chemie und Stoffeigenschaften

Bearbeitet in den Fachbereichen 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 7.2

Aufgaben

Der Themenbereich *Metrologie in der Chemie und Stoffeigenschaften* umfasst die metrologische Rückführung von chemisch-analytischen Messungen in Gasen, Flüssigkeiten und Feststoffen, einschließlich der Quantifizierung enthaltener (Nano-) Partikel. Die rückführbare Bestimmung von Gaseigenschaften, des Gaszustandsverhaltens sowie von Stoffeigenschaften gemäß des Einheiten- und Zeitgesetzes. Die daraus abgeleiteten Aufgaben gliedern sich wie folgt:

1. Rückführung chemisch-analytischer Messungen in der anorganischen Chemie und Elektrochemie sowie der bio-organischen Chemie. Die Schwerpunkte der Arbeiten liegen in den Bereichen klinische Chemie, Umwelt- und Klimaschutz und Energie.
2. Sicherung der Rückführbarkeit in der Gasanalytik hinsichtlich der chemischen als auch isotopischen Zusammensetzung von Gasen und darin suspendierter Partikel (Aerosol Diagnostik (präparativ und analytisch). Dies insbesondere für Umweltschadstoffe und Energiegase (incl. H₂) und für die Abgaszusammensetzung von Verbrennungsprozessen, insbesondere Motoren; Weiterentwicklung der gaschromatografischen Brenngasanalytik, insbesondere im Hinblick auf die Wasserstoffmessung in Gasverteilnetzen. Entwicklung von Verfahren zur rückgeführten Charakterisierung des dynamischen Verhaltens von Messverfahren/Sensoren für die Gasphasenanalytik (d. h. chemische Zusammensetzung, Druck, Gastemperatur und Gasfeuchte. Entwicklung neuer gasanalytischer Primärverfahren auf spektrometrischer Basis sowie die rückgeführte Bestimmung dafür erforderlicher Referenzspektraldaten und deren Einflussgrößen; Erfassung der Gasfeuchte auch in Phasenübergangssystemen.

3. Bestimmung chemisch-physikalischer Eigenschaften von Gasen: Brennwert, Gasdichte, Zünd- und Zustandsverhalten von Energiegasen; Sicherung der Rückführbarkeit von Messungen chemisch-physikalischer Stoffeigenschaften von Festkörpern und Flüssigkeiten: Getreidefeuchte, Flüssigkeitsdichte und kalorische Größen; hochpräzise Bestimmung von Stoffeigenschaften für die Grundlagen der Metrologie: Ermittlung von chemisch-physikalischen Stoffdaten für neue gasförmige und flüssige Energieträger, insbesondere für regenerative Energieträger wie Wasserstoff oder synthetische Kraftstoffe.

Geplante Arbeiten und Ziele

Zu 1.

- Weiterer Ausbau eines Rückführungssystems für die Elementanalytik gemeinsam mit der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) sowie Weitergabe der Einheiten durch Bereitstellung von Referenzwerten und Referenzstandards (Monoelementlösungen) an regulierende Einrichtungen (z. B. BÄK, EDQM).
- Weiterer Ausbau und Verstetigung einer europaweiten Infrastruktur (Europäisches Metrologienetzwerk „TraceLab-Med“) zur Rückführung und Überwachung der Messungen in der Labormedizin in Kooperation mit Referenzlaboratorien der Bundesärztekammer.
- Entwicklung von Primärverfahren auf der Grundlage der Isotopenverdünnungs-Massenspektrometrie für die Quantifizierung von hochkomplexen, klinisch-biologisch relevanten Analyten, z. B. Proteinen und Metallproteinen.

- Entwicklung von Referenzverfahren für multiplexe Gemische von Biomarkern (Metabolomics) für die Erfassung komplexer Gesundheitszustände („disease signatures“).
- Entwicklung primärer Messverfahren für die Bereiche klinische Chemie, Nahrungsmittel- und Umweltanalytik, z. B. Wasseranalytik mit Schwerpunkten in der Speziesanalytik in komplexen Matrices.
- Entwicklung von primären Messverfahren für komplexe Analyt/Matrix-Kombinationen in der klinischen Chemie auf Basis der optischen Spektrometrie, z. B. oberflächenverstärkte Isotopenverdünnungs-Ramanspektrometrie (ID-SERS).
- Entwicklung von optisch-spektrometrischen Mess- und Bildgebungsverfahren (z. B. Raman Imaging) für die Charakterisierung neuer 2D-Funktionsmaterialien (z. B. basierend auf Graphen); Entwicklung von Normalen zur SI-Rückführung solcher Messungen (z. B. stress/strain).
- Entwicklung und Betrieb von primären Messverfahren für die Messgrößen pH-Wert, elektrolytische Leitfähigkeit (z. B. Ozeanografie, Reinstwasser) und Ionenaktivität (z. B. Elektrolyte in Serum); Kalibrierungen von primären Referenzlösungen für diese Größen für Kalibrierlaboratorien.
- Entwicklung und Betrieb von Referenzmessplätzen zur Messung des Ladezustands, der Restkapazität und der Temperatur von Li-Ionenbatteriezellen mittels elektrochemischer Impedanzspektroskopie.

Zu 1 und 2.

- Entwicklung von theoretischen Konzepten, Messverfahren und Referenzmaterialien für SI-rückführbare Isotopenverhältnismessungen (δ -Werte) sowohl auf primärer als auch sekundärer Ebene mit massenspektrometrischen und optisch-spektrometrischen Verfahren (OIRS). Z. B. für hochgenaue Messungen atmosphärischer Isotopensignaturen (z. B. anthropogenes CO_2 , Quellen/Senken-Analytik von Treibhausgasen wie H_2O und CH_4) oder auch zur Bestimmung der Isotopensignatur von regenerativen Energieträgern für die Provenienzanalytik.

Zu 2.

- Entwicklung von Methoden für die Konformitätsbewertung regenerativer Energiegase (z. B. (Bio-)Methan, H_2 , H_2 -Mischungen), bspw. der Edukt-/Produktgase von Brennstoffzellen/Elektrolyseuren mittels optischer Gasstandards oder OIRS.
- Entwicklung, metrologische Qualifizierung und Anwendung spektrometrischer Primär- und Transferverfahren in der Gasanalytik und zur rückgeführten Bestimmung von Spektraldaten sowie deren Druck-, Matrix- und Temperaturabhängigkeit.
- Methoden- und Standardentwicklung für die Rückführung von Low-Cost-Sensoren bspw. für Umweltschadstoffe (NO_2 , O_3 etc.) und deren Einsatz in verteilten Messnetzwerken oder auf Messdrohnen.
- Entwicklung instrumenteller optischer Gasstandards (OGS) zur SI-Rückführung insbesondere von reaktiven/adsorpti-

- ven Gas-Spezies, wie z. B. HCl , NO_2 , NO , NH_3 , H_2O als Ergänzung gasförmiger Referenzmaterialien.
- Entwicklung und Rückführung von Methoden zur Abgasanalytik von Verbrennungsprozessen (bspw. Kraftwerke und Motoren) insbes. von NO_2 , aber auch NO , CO , CO_2 , NH_3 und SO_2 und von präparativen Methoden zur dynamisch/ bzw. dyn.-gravimetrischen Erzeugung von primären und sekundären Referenzgasen für diese Komponenten; Einsatz dieser Methoden zur Rückführung der KFZ-Abgasanalyse im Rahmen der bestehenden KFZ-Typprüfung (stationär bzw. RDE-PEMS) und KFZ-AU und zukünftiger Erweiterungen (bspw. EURO7 bzw. NOX-AU).
- Entwicklung von Aerosolprimär- und -transferstandards für die Partikelanzahldichte, Partikelgrößenverteilung und optischen Aerosolparametern wie der Absorption für Ruß-aerosole aus Verbrennungsprozessen sowie auch für Referenzaerosole aus Zerstäubungs-/Kondensations-/Plasmazerstäubungsprozessen wie bspw. Silber, Polystyrol und Kochsalz, die als Referenznanopartikel für die Kalibrierung von Aerosolmessverfahren eingesetzt werden.
- Rückführung von Aerosolpartikelzählern und Implementierung in die KFZ-AU ab Jan. 2023 sowie Rückführung des gesetzlichen Messwesens (KFZ-AU) an nationale Aerosolprimärstandards für Partikelanzahldichten bis $106/\text{cm}^3$, inklusive Konformitätsbewertung/Zulassung der AU-PN-Zähler.
- Realisierung einer Referenz-Normdichteapparatur zur Bestimmung von Gaszustandsvariablen bes. für feuchte Gase.
- Entwicklung und Weitergabe der nationalen Feuchteskala für den Frost- bzw. Taupunkttemperaturbereich -100 °C bis ca. 95 °C auf Basis coulometrischer Spurenfeuchtegeneratoren und thermodynamischer Zwei-Druck-Generatoren; Erweiterung auf industrierelevante Gasmatrices, insbesondere Energiegase einschließlich Erdgas und Wasserstoff.
- Entwicklung von Permeationsquellen zur Darstellung mobiler, präparativer, dynamisch erzeugter Gas(feuchte)transferstandards und deren gravimetrische Rückführung für die Validierung der nationalen Feuchteskala.
- Entwicklung mobiler analytischer Feuchte-transferstandards (OGS) auf Basis der Laserspektrometrie; Erweiterung auf hoch-dynamische Feuchtemesstechnik; Entwicklung und Einsatz Flugzeug- und Ballon-gestützter, optischer Feuchte-transferstandards zur Rückführung im Umwelt- und Klimaschutz, Entwicklung von H_2O -OGS für Industrieanwendungen bis hin zur Reinstgasen für die Halbleiterfertigung.
- Betrieb des nationalen Normals für die Atemalkoholmessung und Weiterentwicklung des Normals zur Darstellung von Kalibriergasgemischen mit dynamischen Konzentrationsverläufen.
- Entwicklung von Verfahren zur rückgeführten Charakterisierung des dynamischen Verhaltens von Messverfahren/Sensoren für die Gasphasenanalytik (d. h. chemische Zusammensetzung, Druck, Gastemperatur und Gasfeuchte) und Einsatz dynamisch charakterisierter Sensoren für Industrie-, Sicherheits-, oder Umweltsanwendungen wie bspw. der Eddy-Correlation-Gasflussmesstechnik.
- Weiterentwicklung von Verfahren zur Brenngasanalyse und Präparation von Kalibriergasgemischen.
- Entwicklung von neuen chromatografischen Online-Analyseverfahren zum Nachweis von Wasserstoff in Erdgasnetzen.

Zu 3.

- Weiterentwicklung der kalorimetrischen Messeinrichtung zur Brennwertbestimmung (Unsicherheit: 0,05 %) von gasförmigen Energieträgern zu einer Normalmesseinrichtung.
- F+E zur Umrechnung des massebezogenen auf den volumenbezogenen Brennwert mit einer Unsicherheit < 0,01 %.
- Entwicklung einer modular aufgebauten Dichte- und Zustands-Normalmessapparatur für gasförmige Energieträger unter besonderer Berücksichtigung des Zustandsverhaltens von verdampftem LNG (Liquified Natural Gas).
- Viskositätsmessungen an Gasen (Druck bis 40 bar, Temperatur –40 °C bis 200 °C) mit einer Unsicherheit von 0,1 % bis 0,2 %.
- Forschung zur metrologischen Bewertung für reaktionskinetische Parameter fluider Energieträger. Bestimmung des Zündverhaltens fluider Energieträger (z. B. Liquified Natural Gas) zur Entwicklung harmonisierter Kraftstoffkennzahlen (z. B. Methanzahl für Gasmotoren).
- Entwicklung von rückgeführten Messverfahren zur Bestimmung von hoch-dynamischen Größen (Temperatur, Druck und Stoffmengenanteilen) in der Gasphase mittels Stoßrohren und RCM.
- Brennwert- und Heizwertbestimmung sowie Bestimmung von Dichte- und Viskositätswerten an biogenen und neuartigen Energieträgern verschiedener Herkunft für eine zuverlässige Bestimmung des volumen- und massenbezogenen Energiegehalts.
- Untersuchungen zur Dichte- und Viskosität von Liquid Organic Hydrogen Carriers (LOHC) für die zuverlässige Erfassung von Stoffdaten und zur Entwicklung einer Routine zur Bestimmung des Wasserstoffgehalts innerhalb eines LOHC-Systems durch Korrelation mit einer Stoffeigenschaft.

Themenbereich 8:

Metrologie in der Medizin

Bearbeitet in den Fachbereichen 3.1, 3.2, 6.2, 6.3, 7.6, 8.1, 8.2, 8.3, 8.4

Aufgaben

Das Aufgabengebiet des Themenbereichs *Metrologie in der Medizin* besteht in der Bearbeitung von biomedizinischen Messverfahren innerhalb der Metrologie mit dem Ziel, eine bestmögliche Qualitätssicherung zum Wohle der Patientinnen und Patienten zu ermöglichen und neue Lösungswege für metrologische Fragestellungen in der Medizin zu geben. Auf der Grundlage der neuen europäischen Medical Device Regulation (MDR 2017/745) und der In-Vitro Diagnostik Regulation (IVDR 2017/746) werden Sicherheitsbewertungen, messtechnische Kontrollen und Referenzverfahren sowohl für bestehende medizinische Messverfahren als auch für die Zulassung neuer Ansätze benötigt. Darüberhinaus verstärkt der Trend der personalisierten Medizin den Bedarf an qualitätsgesicherten quantitativen Messverfahren, um Therapien spezifisch für Patientengruppen auszuwählen und deren individualisierte Wirkung objektiv zu erfassen. In Zukunft wird auch eine stärkere digitale Integration von multi-parametrischen Messdaten notwendig sein. Grundsätzlich ist für eine Vergleichbarkeit von Gesundheitsdaten deren Qualitätssicherung wie die Bestimmung ihrer Genauigkeit und Verlässlichkeit von hoher Bedeutung. Die Bestimmung der statistischen und systematischen Beiträge zur Unsicherheit der Messdaten ist für eine Gewährleistung der Vergleichbarkeit von digitalen Gesundheitsdaten von hoher Bedeutung. Die Kenntnis beider Unsicherheitsbeiträge für die Entwicklung von Verfahren der künstlichen Intelligenz in der

Medizin von fundamentaler Bedeutung, da diese verlässliche Trainings- und Testdaten benötigen. Alle Aufgaben werden in enger Kooperation mit medizinischen Vereinigungen, klinischen Experten und industriellen Partnern bearbeitet, um technische Entwicklungen hinsichtlich ihrer klinischen Relevanz zu beurteilen, europäische Medizinprodukte zu entwickeln und deren verlässlichen Gebrauch zu gewährleisten. Die Arbeiten umfassen:

1. Entwicklung von Konzepten zur Patientensicherheit und personalisierter Dosis in der medizinischen Bildgebung und neue Methoden der Strahlentherapie (6.2, 8.1).
2. Entwicklung neuer quantitativer Bildgebungsverfahren und Referenzverfahren der Gewebeoximetrie (8.1, 8.3).
3. Entwicklung von Referenzmessverfahren für die molekularbiologische Diagnostik und Laboratoriumsmedizin sowie die Bestimmung von Referenzmesswerten im Rahmen der externen Qualitätssicherung medizinischer Laboratorien (3.1, 8.3).
4. Entwicklung hochempfindlicher magnetischer Messtechnik für Biosignalerfassung (8.2).
5. Metrologie magnetischer Nanopartikel für medizinische Diagnostik und Therapie (8.2).
6. Verfahren zur Analyse großer multiparametrischer Datensätze, um Vergleichbarkeit von Daten und deren Einfluss

auf die Unsicherheit zu untersuchen (8.4). Entwicklung und Bewertung von Verfahren der künstlichen Intelligenz in der Medizin (3.2, 6.2, 8.01, 8.1, 8.4).

Geplante Arbeiten und Ziele

Zu 1.

- Qualitätssicherung der klinischen Dosimetrie im Rahmen des Medizinproduktegesetzes (6.2, 6.3).
- Entwicklung neuer Ansätze zur Bestimmung der Bildqualität in Abhängigkeit der applizierten Dosis für die moderne Röntgendiagnostik (6.2, 8.4). Entwicklung von individuellen Dosimetrieansätzen für die moderne Computertomografie (6.2).
- Bearbeitung von metrologischen Fragestellungen für die MR-bildgeführte Strahlentherapie, speziell für die Strahlentherapieplanung basierend auf MR-Daten und die qualitätsgesicherte Dosimetrie (6.2, 8.1). Entwicklung von Messverfahren für die rückgeführte Dosimetrie für eine Strahlentherapie mit sehr hohen Pulsdosisleistungen (z. B. FLASH-Strahlentherapie) (6.2).
- Entwicklung metrologischer Referenzverfahren für die MR-basierte Strahlentherapieplanung und die MR-geführten Strahlentherapie (6.2, 8.1).
- Entwicklung neuer Konzepte für die Magnetresonanztomografie bei hohen ($B = 3\text{ T}$) und ultrahohen Magnetfeldern ($B = 7\text{ T}$), mit Schwerpunkt auf Messtechnik und numerische Simulation zur Patientensicherheit im MRT sowie deren Standardisierung (8.1).
- Forschungsarbeiten zur Erprobung paralleler Sendetechniken für die Erhöhung der Sicherheit von MR-Untersuchungen an Patienten mit metallischen Implantaten (8.1).

Zu 2.

- Entwicklung von quantitativen Verfahren für MR-Bildgebung und MR-Spektroskopie, MR/PET-Bildgebung, welche Messwerte von physikalischen oder biophysiologicalen Messgrößen auf einer abgesicherten Skala liefert (8.1).
- Reduktion von physiologischer Bewegung zur Erhöhung der Messgenauigkeit in der diagnostischen Bildgebung und Verbesserung in der Strahlentherapie (6.2, 8.1).
- Entwicklung und Bereitstellung von quantitativen Nah-Infrarot (NIR)-Referenzmethoden für die Kalibrierung und Validierung von Messverfahren für die Gewebeoximetrie sowie Verfahren zur lokalen Quantifizierung von Fluoreszenz-Kontrastmitteln *in vivo* (8.3).
- Entwicklung von optisch-spektroskopischen Mess- und Bildgebungsverfahren für die nicht-invasive quantitative Bestimmung wichtiger Biomarker, z. B. Hämoglobinkonzentration und Sauerstoffsättigung im Gewebe (8.3).

Zu 3.

- Entwicklung von durchflusszytometrischen und massenspektrometrischen Messverfahren zur Gewährleistung von Referenzmesswerten für die gesetzlich vorgeschriebene Qualitätssicherung in der Laboratoriumsmedizin und in der klinischen Biochemie (3.1, 3.2, 8.3).
- Entwicklung neuer durchflusszytometrischer und massenspektrometrischer Referenz-Messverfahren, insbesondere für den Immunstatus (3.1, 8.3).
- Aufbau einer automatisierten mikroskopischen Zellzählung als primäres Messverfahren und Entwicklung eines bildgebenden Durchflusszytometers (8.3).
- Entwicklung eines sogenannten Durchfluss-Virometers auf der Basis von laserinduzierter Fluoreszenz zur Konzentrationsbestimmung von Nanopartikeln sowie der Einsatz von quantitativen Nukleinsäuretests (8.3).
- Etablierung eines digitalen DNA-Messverfahrens als Primärverfahren der Nukleinsäureanalytik für Viren (z. B. COVID-19, HIV) oder Bakterien (z. B. Antibiotika-Resistenzen) (3.1, 3.2, 8.3).

Zu 4.

- Anwendung hochempfindlicher magnetischer Messverfahren in der medizinischen Diagnostik, insbesondere basierend auf SQUID-Messtechnik und auf neuen hochempfindlichen Magnetfeldsensoren und atomaren Magnetometern (8.2).
- Weiterentwicklung der MR-Bildgebung im Niedrigfeldbereich (8.2).

Zu 5.

- Entwicklung von Verfahren zur Qualitätssicherung magnetischer Nanopartikel (z. B. Magnetrelaxometrie, Magnetic Particle Spectroscopy und NMR-Relaxometrie) unter biomedizinischen Einsatzbedingungen (8.2).
- Forschungsarbeiten zu neuen Bildgebungs- und Therapieverfahren basierend auf magnetischen Nanopartikeln (8.2).
- Vorbereitung internationaler Normen zur physikalischen Charakterisierung magnetischer Nanopartikel für den biomedizinischen Bereich (8.2).

Zu 6.

- Mitwirkung an Studien mit dem Ziel, direkten Zugriff auf große Datenmengen zu erhalten, um die Vergleichbarkeit von Mess- und Bilddaten in der Medizin zu untersuchen. (8.1, 8.3, 8.4).
- Entwicklung neuer Analyseverfahren mit Bestimmung des Einflusses der Unsicherheit von Daten. Insbesondere Analyse multiparametrischer Datensätze zur Ermittlung der systematischen und statistischen Unsicherheiten in Daten, die zum Trainieren von KI-Methoden verwendet werden (3.2, 6.2, 8.01, 8.4).

- Entwicklung und Bereitstellung von Referenzdaten und Referenzalgorithmen zum Trainieren Testen und Validieren von KI-Methoden (8.01, 8.1, 8.4, 6.2).
- Entwicklung von quantitativen Qualitätsmerkmalen für KI-Verfahren in der Medizin, wie z. B. Erklärbarkeit, Unsicherheit und Robustheit (3.2, 6.2, 8.1, 8.4).

Themenbereich 9:

Photometrie und Radiometrie

Bearbeitet in den Fachbereichen 4.1, 4.2, 4.5, 7.1, 7.2, 7.3, und 7.6

Aufgaben

Auf der Grundlage des Einheiten- und Zeitgesetzes ist in diesem Themenbereich die zentrale Aufgabe die Darstellung und Weitergabe radiometrischer und photometrischer Einheiten. Metrologische Grundlage der Radiometrie sind dabei Empfänger-Primärnormale und nationale Strahler- und Lampennormale. Im Einzelnen:

1. Empfänger- und strahlergestützte Photometrie, Farbmess-technik, Spektralradiometrie, Laserradiometrie, Photovoltaik sowie Einzelphotonenquellen und -empfänger. Entwicklung neuartiger Messtechnik, neuartiger Normale, rückgeführter Messverfahren und Messplätze für innovative schmalbandige Licht- und Strahlungsquellen sowie zur Charakterisierung und Kalibrierung bildgebender Licht- und Strahlungsmesstechnik.
2. Empfängergestützte Radiometrie im Wellenlängenbereich oberhalb 200 nm auf der Basis spektral aufgelöster Strahlungsleistungsmessungen mit Empfänger-Primärnormalen, insbesondere für die Photometrie und die Absolut-Strahlungsthermometrie.
3. Strahler- und empfängergestützte Radiometrie, Reflektometrie, Spektrometrie und Nanometrologie unter Nutzung von Synchrotronstrahlung der Speicherringe Metrology Light Source (MLS) und BESSY II im THz-, IR-, UV-, VUV-, EUV- und Röntgenbereich.
4. Reflexions- und Transmissionsmessungen in verschiedensten Geometrien (diffus, gerichtet, goniometrisch) für die industrielle Messtechnik, Fertigung und Qualitätssicherung sowie Anwendungen in der Forschung; spektrophotometrische Messungen; Charakterisierung optischer Komponenten; Entwicklung rückgeführter Messverfahren für komplexe neuartige Strukturen und funktionale Oberflächen einschließlich Messung der Polarisations-eigenschaften.

Geplante Arbeiten und Ziele

Zu 1.

- Radiometrische Realisierung der SI-Basiseinheit der Lichtstärke, der Candela, basierend auf neuartigen, eigens für die Realisierung entwickelten $V(l)$ -Empfängern.
- Entwicklung neuer Messverfahren für moderne Lichtquellen (z. B. LEDs und OLEDs) und ihre Charakterisierung.
- Rückführung von Messverfahren mit bildgebenden Technologien zur Bestimmung von Leuchtdichte-, Lichtstärke- bzw. Beleuchtungsstärkeverteilungen sowie zur quantitativen Bestimmung des vollständigen Strahlenkörpers beliebiger Lichtquellen.
- Charakterisierung bildgebender (kamerabasierter) Technologien, spektral auflösender Verfahren sowie Nahfeldgoniophotometer-basierter Verfahren für die Radiometrie und Photometrie.
- Entwicklung von Charakterisierungs-, Korrektur- und Kalibrierverfahren für kompakte Array-Spektralradiometer.
- Rückführung für Messungen der terrestrischen solaren UV-Strahlung und abgeleiteten Größen durch angepasste, kalibrierte Empfänger.
- UV-Radiometrie für hohe Bestrahlungsstärken: Entwicklung neuer Transferrnormale (insbesondere auch auf UV-LED-Basis) und Kalibrierverfahren für eine Vielzahl technischer Anwendungen wie Wasser- und Luftentkeimung, Härtung von Farbschichten und Herstellung von Polymerprodukten.
- Erweiterung des Dienstleistungsangebotes im Bereich der Laserradiometrie im Wellenlängenbereich von 193 nm bis 10,6 μm und im Leistungsbereich einiger μW bis zu einigen kW.
- Entwicklung von Charakterisierungs- und Kalibrierverfahren für Komponenten im Bereich der Einzelphotonenmetrologie (Detektoren und Quellen).
- Evaluierung der Nutzung verschränkter Photonen im Bereich der Radiometrie.
- Entwicklung primärer Messverfahren zur Kalibrierung von Solarmodulen.

- Entwicklung von Referenzmessplätzen zur genauestmöglichen Bestimmung aller Parameter, die für das Energy-Rating von Solarmodulen nach IEC 61853 notwendig sind (Leistung unter STC, Winkelabhängigkeit, Windabhängigkeit, Bestrahlungsstärke und Temperaturabhängigkeit).
- Kontinuierliche Reduzierung der Messunsicherheit für Referenzsolarzellen auf 0,3 % ($k = 2$).
- Entwicklung eines Verfahrens und von Messgeräten, um ein High-End-Monitoring von Solarparks zu ermöglichen.

Zu 2.

- Bewahrung und Ausbau der internationalen Spitzenstellung in der empfangergestützten Radiometrie auf der Grundlage hochgenauer Detektor-Primärnormale in den für die Radiometrie, die Photometrie und die Strahlungsthermometrie relevanten Wellenlängenbereichen vom Ultraviolett bis ins ferne Infrarot.
- Weitergabe der Skala der spektralen Empfindlichkeit im Wellenlängenbereich von 200 nm bis 11 μm mit relativen Unsicherheiten bis hinab zu 10^{-5} an Kunden.
- Rückführung der thermodynamischen Temperaturen neuartiger eutektischer Metall-Kohlenstoff-Hochtemperatur-Fixpunkte auf die Detektor-Primärnormale für eine mittelfristig verbesserte und erweiterte „praktische“ Internationale Temperaturskala (siehe auch Themenbereich 10, Pkt. 1).
- Experimentelle Validierung des sog. Predictable-Quantum-Efficient-Detectors (PQED) als ein mögliches neues Primärnormal.
- Entwicklung und Aufbau eines fasergekoppelten Kryoradiometers für den Pikowatt-Leistungsbereich als Primärnormal für die Charakterisierung von Einzelphotonen-Quellen und -Detektoren.
- Experimentelle Überprüfung der physikalischen Modelle, die für die Berechnung der spektralen Empfindlichkeit von speziellen Si-Photodioden entwickelt werden.
- Erweiterung der empfangergestützten Radiometrie im nahen und mittleren infraroten Spektralbereich sowie im ferninfraroten THz-Bereich entsprechend den Anforderungen der Entwickler und der Anwender von Detektoren z. B. aus den Gebieten der Thermografie, der Erdfernerkundung oder der Sicherheitstechnik.
- Durchführung einer internationalen Vergleichsmessung der spektralen Empfindlichkeit im THz-Bereich.

Zu 3.

- Weitergehende Charakterisierung der Messmöglichkeiten für die Kalibrierung von Strahlungsquellen im Wellenlängenbereich von 7 nm bis 400 nm und Untersuchungen zur Darstellung der spektralen Bestrahlungsstärke von 116 nm bis 200 nm.
- Ausbau der Instrumentierung für die Untersuchung von Röntgen-, EUV- und VUV-Optiken.
- Forschung zur referenzprobenfreien Röntgenspektrometrie und zur diffraktiven Nanometrologie: Untersuchung der

elementaren Zusammensetzung, der chemischen Speziation und der Morphologie von nanoskaligen Materialsystemen; Ausbau der Messmöglichkeiten im Tender-X-ray-Bereich.

- Erweiterung der Messmöglichkeiten für die quantitative Untersuchung von Oberflächen und dünnen Schichten durch VUV-Ellipsometrie und VUV-Elektronenspektroskopie sowie IR/THz-Mikro-Spektrometrie und -Streulicht-Nahfeldmikroskopie.
- Untersuchungen zu neuartigen Betriebsmodi des Elektronenspeicherrings MLS zur Erzeugung kohärenter Synchrotronstrahlung, z. B. in Form des Steady-State-Microbunching-Mechanismus.

Zu 4.

- Erweiterung des Spektralbereichs für diffuse Reflexionsmessungen auf den Bereich des atmosphärischen Fensters (250 nm bis 2500 nm).
- Erweiterung des Dienstleistungsangebotes im Bereich der gerichteten Reflexion und Transmission in den Wellenlängenbereich bis 18 μm .
- Forschung zur optischen Appearance und zu kameragestützten Messungen, insbesondere an Oberflächen mit Effektpigmenten.
- Entwicklung eines Messverfahrens zur Bestimmung der BTDF.
- Forschung bzgl. BRDF in Rückstreugeometrien mit besonderem Bezug zum autonomen Fahren.
- Brechzahlmessung von Festkörpern und Flüssigkeiten sowie Entwicklung und Validierung von Verfahren zur Messung der komplexen Brechzahl ($n+k$) an Oberflächen und dünnen Schichtsystemen.
- Messung der Polarisationsdrehung optisch aktiver Quarzplättchen, Charakterisierung der polarisierenden Eigenschaften von Oberflächenstrukturen im Mikro- und Nanobereich.

Themenbereich 10:

Thermometrie

Bearbeitet in den Fachbereichen 7.3 bis 7.6

Aufgaben

In der *Thermometrie* sorgt die Metrologie für die Darstellung, Weitergabe und Weiterentwicklung der internationalen Temperaturskalen, für damit zusammenhängende thermophysikalische Größen und für die Bereitstellung nationaler Normale für die thermische Energie:

1. Gemäß Einheiten- und Zeitgesetz wird die Darstellung der SI-Einheit der Temperatur und die Realisierung und Weitergabe der internationalen Temperaturskalen ITS-90 und PLTS-2000 auf höchstem metrologischem Niveau dauerhaft sichergestellt. Darüber hinaus gehende Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zielen auf verbesserte Messverfahren und praktisch handhabbare Thermometer in technisch relevanten Bereichen und in der Forschung ab.
2. Primäre Thermometrie zur Messung der thermodynamischen Temperatur mit dem Ziel einer verbesserten Quantifizierung der Übereinstimmung der genannten Skalen mit der thermodynamischen Temperatur. Dies ist von besonderer Wichtigkeit, da im neuen SI sowohl eine Realisierung der Einheit über die Skalen als auch eine direkte Realisierung mittels Primärthermometrie erlaubt ist.
3. Darstellung und Weitergabe der Skala für die thermische Energie und Technologietransfer an die Industrie sowie Arbeiten im Bereich der Energiewende.
4. Kalibrierung und Prüfung von berührenden und berührungslosen Thermometern, Fixpunktzellen, Normalproben, Temperaturstrahlern, Filtradiometern, Thermografiekameras, Wärmemengenzählern sowie Messung des Emissionsgrads und thermoelektrischer Materialeigenschaften.

- Einsatz und Weiterentwicklung eines Messplatzes für Strahlungsthermometrie mit reduziertem Strahlungshintergrund unter Vakuum, insb. für die satellitengestützte Infrarotfernerkundung mit Hyperspektralkameras, mit ausreichend kleinen Messunsicherheiten für Umwelt-, Wetter- und Klimabeobachtungen.
- Entwicklung praktischer Thermometer im Temperaturbereich der PLTS-2000 und darunter: Weiterentwicklung von Magnetfeld-Fluktuationsthermometern und Stromrauschthermometern unter Verwendung eigenentwickelter supraleitender Sensoren (SQUIDs, Superconducting QUantum Interference Devices); Kommerzielle Bereitstellung derartiger Thermometer für die Tieftemperatur-Community, bei Bedarf mit Kalibrierschein im Rahmen des vertraglich geregelten Technologietransfers.
- Entwicklung und Charakterisierung von thermoelektrischen Referenzmaterialien, u. a. zur Energiegewinnung aus Abwärme und Untersuchung der thermophysikalischen Eigenschaften von Edelgasen für die Primärthermometrie und neuartige Druckstandards.

Zu 2.

- Entwicklung eines in weiten Temperaturbereichen einsetzbaren primären dualen Widerstand-Rausch-Thermometers für die Darstellung des Kelvin und für Untersuchungen der ITS-90 im Bereich von 400 K bis 1000 K.
- Erweiterung des Einsatzbereichs der Absolut-Strahlungsthermometrie im Bereich unterhalb 419 °C für die Messung thermodynamischer Temperaturen.

Geplante Arbeiten und Ziele

Zu 1.

- Bestimmung der Abweichung von der thermodynamischen Temperatur, u. a. bei den Temperaturwerten der Fixpunkte, in der *Mise en Pratique* zur Definition des Kelvin (*MeP-K*).
- Entwicklung praktischer Thermometer für den Bereich der technischen Temperaturmessung, basierend auf Rauschthermometrie und photonischer Thermometrie.
- Entwicklung neuartiger eutektischer und peritektischer Fixpunkte und Bestimmung ihrer thermodynamischen Phasenübergangstemperaturen bis 3000 °C (insbesondere Co-C, Pd-C, Pt-C, Ru-C, Re-C, WC-C) mit strahlungsthermometrischen und radiometrischen Methoden sowie Entwicklung neuartiger, zur Interpolation in diesem Temperaturbereich einsetzbarer Berührungsthermometer.

Zu 3.

- Umsetzung der erzielten F&E-Resultate zur Reduktion der Unsicherheit bei der Messung thermischer Energie insbesondere im Rahmen von Pilotprojekten bei solarthermischen Kraftwerken; Ziel ist die Steigerung der Kraftwerkseffizienz im Prozentbereich.
- Durchführung von drittmittelfinanzierten Forschungsvorhaben mit der deutschen Industrie, der TU Berlin und dem DLR zur nichtinvasiven laseroptischen und ultraschallbasierten Vor-Ort-Durchfluss-Messung sowohl in konventionellen (Wärmeträgermedium Wasser) als auch solarthermischen Kraftwerken (Wärmeträgermedien Wasser-Glykolegemische, Thermo-Öle und Salzschnmelzen).
- Aufbau einer neuartigen laseroptischen, auf der Rayleigh-

- Streuung beruhenden Ganzfeldmethode zur simultanen Messung der Geschwindigkeits- und Temperaturverteilung in strömenden thermischen Energieträgern.
- Untersuchung der thermophysikalischen Eigenschaften von wichtigen Gasen für die Energiewende, wie Wasserstoff und Wasserstoffgemische.

Zu 4.

- Aufrechterhaltung und Verbesserung der Qualität der Dienstleistungen für die deutsche Thermometerindustrie durch Ausdehnung des berührend gemessenen Temperaturbereichs bis 1800 °C.

- Die PTB führt 80 % aller Konformitätsbewertungen von Wärme- und Kältezählern in Europa und 40 % weltweit durch; Kunden sind fast alle Wärmemengenzähler-Hersteller in Europa; Ziel ist es, mit dieser Dienstleistung für die deutschen und europäischen Hersteller den internationalen Markt (insbesondere China) zu erschließen.
- Aufbau verbesserter Normalmesseinrichtungen für den spektralen Emissionsgrad mit den Zielen einer Ausdehnung des Spektralbereichs bis zu 100 µm und des Temperaturbereichs auf 1000 °C bei gleichzeitiger Verringerung der Unsicherheit auf 1 % und der Schaffung der Messmöglichkeit des Emissionsgrads von semitransparenten Materialien.

Themenbereich 11:

Zeit und Frequenz

Bearbeitet in den Fachbereichen 4.3, 4.4, im Referat Q.42 und im QUEST-Institut an der PTB

Aufgaben

Die Forschungs- und Entwicklungsaufgaben des Themenbereichs *Zeit und Frequenz* leiten sich im Kernbereich aus dem Einheiten- und Zeitgesetz (EinhZeitG) ab und umfassen die Weiterentwicklung des Feldes hin zur Nutzung optischer Uhren und optischer Referenzfrequenzen:

- Darstellung der Zeiteinheit: Betrieb der primären Fontänenuhren CSF1 und CSF2, der primären Atomstrahluhren CS1 und CS2 und einer Gruppe kommerzieller Atomfrequenznormale.
- Realisierung der Atomzeitskala UTC(PTB) als Grundlage der gesetzlichen Zeit, UTC(PTB) + 1 h bzw. UTC(PTB) + 2 h und der freien Atomzeitskala TA(PTB).
- Weitergabe der Zeiteinheit und der gesetzlichen Zeit über den Langwellensender DCF77, einen Telefonmodemdienst, das Internet und auf dem PTB-Campus Braunschweig.
- Internationale Satellitenzeitvergleiche mit Vergleichsunsicherheiten von besser als 10^{-15} pro Tag, Mitarbeit an der Realisierung des Zeitsystems des europäischen Satellitennavigationssystems Galileo. Entwicklung von Methoden zur optischen Zeit- und Frequenzübertragung u. a. mittels Glasfasern und zur Weitergabe hochgenauer optischer Frequenzen.
- Entwicklung optischer Uhren auf der Basis eines lasergekühlten gespeicherten Ytterbiumions ($^{171}\text{Yb}^+$) und ultrakalter neutraler Strontiumatome (^{87}Sr -Gitteruhr) als sekundäre Realisierung der Zeiteinheit und für Beiträge zu Zeitskalen. Entwicklung einer transportablen ^{87}Sr -Gitteruhr für Vergleichsmessungen. Entwicklung ultrastabiler Laser für die

Abfrage optischer Uhren und die Weitergabe über Glasfasern an Nutzer.

- Forschung an neuen Referenzsystemen für optische Uhren: mit einem Aluminiumion ($^{27}\text{Al}^+$), hochgeladenen Ionen und auf der Basis eines Kernübergangs in ^{229}Th . Entwicklung von Multi-Ionen-Uhren basierend auf In^+ , Yb^+ und Ca^+ -Ionen. Durchführung von Tests fundamentaler Physik mit optischen Uhren.

Geplante Arbeiten und Ziele

Zu 1.

- Betrieb der Cesium-Fontänenuhren CSF1 und CSF2 für die Steuerung von UTC(PTB) und TAI sowie für interne und externe Frequenzmessungen mit Unsicherheiten im 10^{-16} -Bereich.
- Weiterentwicklung der Fontänenuhren CSF1 und CSF2 mit dem Ziel der Reduzierung der systematischen und statistischen Unsicherheiten nebst Erhöhung der Dauerbetriebstabilität.

Zu 2.

- Optimierung der Stabilität von UTC(PTB) (Normalfrequenz und 1 PPS) durch Weiterentwicklung von Soft- und

Hardware. Steuerung eines H-Masers nach Vergleich mit optischen Frequenznormalen als Beitrag zu TA(PTB).

Zu 3.

- Modernisierung und Erweiterung der Signalerzeugung und Signalüberwachung des Senders DCF77 im Hinblick auf die Weiterführung des Betriebs bis 2031 und darüber hinaus.
- Verteilung von Normalfrequenzsignalen mit höchster Genauigkeit auf dem Campus der PTB Braunschweig (für 4.3 und QUEST).
- Modernisierung der Überwachung der NTP-Server und der PTP-Master-Uhren. Verbreitung der gesetzlichen Zeit über gesichertes NTP nach dem Standard NTS, Mitarbeit bei der Entwicklung von Sicherungsverfahren für PTP und White Rabbit. Betrieb eines NTP-Servers im Institut Berlin. Aufbau eines White-Rabbit-Netzes auf dem Campus der PTB.

Zu 4.

- Weiterentwicklung der Zeitvergleiche über geostationäre Satelliten durch Test von neuen Einrichtungen zur Signalerzeugung und Verarbeitung (software defined radio).
- Kalibrierung von Zeitvergleichseinrichtungen in den sog. Group-2-Laboratorien im Bereich von EURAMET und in Deutschland (BKG, DLR, DTAG) im Rahmen der Zusammenarbeit mit dem BIPM.
- Betrieb von Referenzstationen als Teil globaler Netzwerke der ESA, der Europäischen Kommission und des Internationalen GNSS Monitoring und Assessment Service (iGMAS). Betrieb einer Bodenstation der ESA als Teil der ACES-Mission (Uhren an Bord der internationalen Raumstation ISS).
- Evaluierung, Nutzung und Weiterentwicklung phasenkontrollierter Glasfaserstrecken zur Übertragung von Zeitmarken und Frequenzreferenzen. Planung, Entwicklung und Implementierung einer verzweigten Link-Struktur der Faserverbindungen. Durchführung von Frequenzvergleichen optischer Uhren an unterschiedlichen Orten.

Zu 5.

- Evaluierung und Weiterentwicklung der $^{171}\text{Yb}^+$ -Frequenznormale und ^{87}Sr -Gitteruhren zu verbesserter Stabilität mit Unsicherheiten im niedrigen 10^{-18} -Bereich; Durchführung von Frequenzvergleichen zwischen Frequenznormalen der PTB und mit externen Partnern. Nutzung, Weiterentwicklung und Evaluierungen der transportablen ^{87}Sr -Gitteruhr der PTB in der relativistischen Geodäsie mit Unsicherheiten im 10^{-17} -Bereich und darunter.
- Frequenzvergleiche unter Nutzung von Korrelationsspektroskopie gleicher und verschiedener Uhrensyste-me: Ziel $u_B < 10^{-18}$, $s \ll 10^{-15}(\text{t/s})^{-1/2}$. Weiterentwicklung des „composite clocks“-Ansatzes zur Verbesserung von Stabilität und Genauigkeit. Auswertung von Frequenzvergleichen für Tests fundamentaler Prinzipien.

- Beiträge der optischen Uhren zur Kalibrierung von TAI und zur Steuerung der lokalen freien Atomzeitskala TA(PTB).
- Weiterentwicklung, Evaluierung und Nutzung hochstabiler transportabler Resonatoren und darauf basierender Laserquellen, kryogener optischer Resonatoren und optischer Beschichtungen mit minimalem thermischem Rauschen. Bereitstellung und Weitergabe der hochstabilen optischen Frequenz an die optischen Uhren innerhalb der PTB.

Zu 6.

- Inbetriebnahme, Evaluierung und Nutzung der $^{27}\text{Al}^+$ -Quantenlogik-Uhr; Entwicklung und Implementierung neuer Mess- und Kühlverfahren für Unsicherheiten im niedrigen 10^{-18} -Bereich. Aufbau einer transportablen Al^+ -Quantenlogik-Uhr; Frequenzvergleiche mit transportablen Uhren an ausgewählten Standorten; Messung einer Gravitationspotential-Differenz durch Frequenzvergleich zweier optischer Uhren über eine Glasfaserverbindung.
- Inbetriebnahme, Evaluierung und Nutzung einer $^{115}\text{In}^+$ -Multi-Ionen-Uhr; Entwicklung und Implementierung neuer Mess- und Kühlverfahren für eine Instabilität unterhalb der einer Einzelionenuhr sowie Unsicherheiten im 10^{-19} -Bereich. Entwicklung von Konzepten, Multi-Ionen-Ansätze auf andere Ionenspezies zu erweitern.
- Präzisionsspektroskopie an hochgeladenen Ionen wie z. B. $^{40,42,44,48}\text{Ca}^{14+}$ und $^{58}\text{Ni}^{12+}$.
- Entwicklung von Verfahren zur Unterdrückung von Linierverschiebungen in $^{40}\text{Ca}^+$ -Multi-Ionen-Systemen. Untersuchung von Verschränkung zur Verbesserung des Signal-zu-Rausch-Verhältnisses im Vergleich zu unkorrelierten Atomen.
- Untersuchung des ^{229}Th -Kerns und seiner niederenergetischen Kernresonanz durch VUV-Laserspektroskopie in Bezug auf seine Eignung als Referenz einer optischen Uhr.
- Frequenzvergleiche verschiedener Uhren und Referenzsysteme für Tests fundamentaler Physik (Lokale Positionsinvarianz, Lokale Lorentz-Invarianz, Suche nach Dunkler Materie).

Themenbereich 12:

Mathematik und metrologische Informationstechnik

Bearbeitet in den Fachbereichen 8.4 und 8.5

Aufgaben

Das Gebiet *Mathematik in der Metrologie* beschäftigt sich mit mathematischen und statistischen Fragestellungen und unterstützt die experimentellen Gruppen der PTB. Das Spektrum der Themen reicht dabei von Beratung über begleitende Forschungsarbeiten bis hin zur Grundlagenforschung in angewandter Mathematik und Statistik, Kooperation und Projekten mit externen Partnern. Aktuelle Schwerpunkte sind maschinelles Lernen und künstliche Intelligenz sowie virtuelle Experimente. Zum Fachbereich gehört seit 2021 eine Heidenhain-Gruppe zum Thema „Maschinelles Lernen und Unsicherheit“, die mit einer Professur an der TU Berlin verbunden ist. Zudem spielen Verfahren zur Analyse großer Datenmengen sowie virtuelle Experimente eine immer größere Rolle (vgl. auch Abschnitt zur Digitalisierung oben).

1. Modellierung physikalischer Prozesse in der Metrologie mit partiellen Differentialgleichungen, Lösung von inversen Problemen und Modellierung komplexer Systeme, Verfahren zur Uncertainty Quantification für aufwendige Modelle.
2. Statistische Datenanalyse zur Auswertung von Messungen, Grundlagen der Messunsicherheitsbestimmung, Bayes'sche Verfahren und Auswertung von Key Comparisons.
3. Verfahren zur Analyse großer Mengen von Daten, Verfahren zur Dimensionsreduktion.
4. Verfahren des maschinellen Lernens und der künstlichen Intelligenz in der Metrologie, Entwicklung von Methoden bzgl. Unsicherheit, Robustheit und Erklärbarkeit, Bereitstellung von Referenzdatensätzen, Entwicklung von Benchmarkverfahren.
5. Praxisorientierte Messunsicherheit, Mitarbeit im European Metrology Network Mathmet für Mathematik und Statistik in der Metrologie, Koordination europäischer Forschungsprojekte, Vertretung der PTB in nationalen und internationalen Gremien.

Das Aufgabengebiet der Fachdisziplin *Metrologische Informationstechnik* besteht einerseits in Querschnittsaufgaben auf dem Gebiet der Informationstechnik im gesetzlichen Messwesen und andererseits in der Bauartzulassung von Geldspielgeräten sowie den dazugehörigen speziellen Aufgaben. Das übergeordnete Ziel ist eine spezifische Unterstützung der Metrologie, die fachkundige PTB-weite Koordination dieser Aktivitäten und die Vertretung in den relevanten nationalen und internationalen Harmonisierungsgremien. Die Tätigkeiten im Bereich der Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) sind auf den unmittelbaren Bedarf im gesetzlichen Messwesen und der metrologischen Kernkompetenz mit dem Ziel ausgerichtet, die Dienstleistungen der PTB gegenüber ihren

Kunden aus der Industrie auf dem gewohnt hohen Qualitätsniveau zu garantieren, auszubauen und durch vorlauforientierte Forschungs- und Entwicklungstätigkeit für zukünftige Herausforderungen sicherzustellen. Des Weiteren obliegt dem Fachbereich *Metrologische Informationstechnik* die Bauartzulassung digitaler Wahlsysteme nach BWahlGV und es werden Softwareprüfungen für industrielle Sensornetzwerke nach DIN EN 12830 i. V. m. dem WELMEC Guide 7.2 „Software“ angeboten.

6. Querschnittsaufgaben im Bereich Prüfung und Beratung für Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) in Messsystemen im gesetzlichen Messwesen.
7. Entwicklung von Referenzarchitekturen und -verfahren zur Sicherung der metrologischen Anforderungen an Messsysteme, Geldspielgeräte und digitale Wahlsysteme.
8. Erarbeitung von Handlungsempfehlungen für die Stakeholder auf nationaler, europäischer und internationaler Ebene.
9. Prüfung, Zulassung und Beratung im Bereich softwaregestützter Geldspielgeräte.
10. Begutachtungstätigkeiten.

Geplante Arbeiten und Ziele

Zu 1.

- Simulationen und virtuelle Experimente, d. h. realistische Simulationen von Messgeräten, mit dem Ziel der Optimierung und der Berechnung der Messunsicherheiten.
- Numerische Verfahren für partielle Differentialgleichungen erfordern z. B. Finite-Elemente-Verfahren, Finite-Differenzen-Verfahren.
- Modellierung und Simulation von Anwendungen aus den Feldern Nanometrologie, Optik, Flow und Medizinphysik.
- Methoden zur „Uncertainty Quantification“, Lösung statistischer inverser Probleme für Anwendungen mit computer-aufwendigen Modellen; Surrogatmodellierung.

Zu 2.

- Entwicklung und Anwendung von statistischen Methoden und Verfahren der Datenanalyse und Signalverarbeitung.
- Datenanalyse für Anwendungen aus den Fachabteilungen der PTB (Mechanik, Elektrizität, Optik, Temperatur und Medizinphysik).
- Entwicklung von Methoden zur Bestimmung von Messunsicherheiten und Analyse von internationalen Ringvergleichen.

- Analyse dynamischer Messungen und Bayes'sche Methoden für Regressionsprobleme.

Zu 3.

- Analyse von großen Datenmengen, insbesondere Anwendungen für medizinische Bildgebungsverfahren, optische Verfahren mit hoher Auflösung und Sensornetzwerke.
- Techniken der Dimensionsreduktion und zur Optimierung der Datenaufnahme.
- Neue statistische Verfahren, Bayes-Methoden für hochdimensionale Systeme.

Zu 4.

- Entwicklung von Methoden zur Bestimmung von Unsicherheiten in Verfahren des maschinellen Lernens (Einrichtung einer gemeinsamen Juniorprofessur mit dem Institut für Informatik an der TU Berlin).
- Entwicklung und Implementation von Methoden zur Prüfung der Robustheit sowie zur Erklärbarkeit und Interpretierbarkeit der Ergebnisse für Verfahren des maschinellen Lernens.
- Entwicklung und Anwendung von Methoden der künstlichen Intelligenz in der Medizin (PTB-Programm „AI for Health“).
- Entwicklung und Anwendung neuronaler Netze zur schnellen Simulation physikalischer Modelle sowie zur Lösung inverser Probleme.
- Bereitstellung und Erzeugung von Trainingsdaten aus Messungen und Simulationen relevanter Prozesse z. B. in der Medizinphysik.

Zu 5.

- Interne und externe Beratung und Fortbildungsveranstaltungen zu praxisorientierter Bestimmung von Messunsicherheiten.
- Erarbeitung und Harmonisierung von Richtlinien oder Software für die Praxis.
- Europaweites Zentrum im Bereich Mathematik für die Metrologie (MATHMET).

Zu 6.

- Erarbeitung von Softwareanforderungen und Prüfanweisungen auf der Basis der europäischen Messgeräte-Richtlinie MID und des nationalen Mess- und Eichgesetzes.
- Mitarbeit in nationalen und internationalen Gremien des gesetzlichen Messwesens.
- Durchführung von Risikobewertungen und -analysen für softwaregesteuerte Messgeräte.

Zu 7.

- Gezielter Erhalt und Ausbau der Expertise durch Forschungsarbeiten in relevanten Technologiefeldern.
- Beobachtung der Entwicklungen aufgrund der Digitalisierung beim Einsatz von Wahlsystemen, z. B. im Rahmen kommender Bundestagswahlen. Aufbau der Expertise im Bereich des E-Votings.
- Digitale Unterstützung bestehender Dienstleistungen der EU-Konformitätsbewertungsstellen und der Prozesse der EU-Marktaufsicht- und Verifikationsinstitutionen.

Zu 8.

- Leitung und Mitarbeit in nationalen und internationalen Gremien des gesetzlichen Messwesens (u. a. WELMEC und OIML) und Standardisierungsausschüssen für intelligente Messgeräte.
- Überführung der Referenzarchitekturen und -Prozeduren in Standards über diese Gremien.
- Softwareprüfungen für industrielle Sensornetzwerke nach DIN EN 12830 i. V. m. dem WELMEC Guide 7.2 „Software“ als Dienstleistung für die Industrie in Kooperation mit dem TÜV-Nord.

Zu 9.

- Beratung der Industrie, BSI-anerkannter Prüfstellen, der Ordnungsbehörden, der Sachverständigen, der Öffentlichkeit und der Bundesressorts.
- Die Bewertung von Sicherheitsgutachten und neuen Angriffsvektoren.
- Unterstützung der vom BMWK geführten Evaluation der SpielV.
- Beobachtung und Bewertung der Entwicklungen des Online-Gaming.

Zu 10.

- Begutachtungstätigkeiten für die Deutsche Akkreditierungsstelle (DAkkS) und die Konformitätsbewertungsstelle (KBS) der PTB.

Themenbereich 13:

Physikalische Sicherheitstechnik und Explosionsschutz

Bearbeitet in den Fachbereichen 3.5, 3.6, 3.7

Aufgaben

Der Themenbereich *Physikalische Sicherheitstechnik und Explosionsschutz* ist Teil der Kooperation mit der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) auf dem Gebiet „Chemisch-physikalische Sicherheitstechnik“ mit folgenden Aufgaben:

1. Metrologische Aufgaben: Aufbau der metrologischen Infrastruktur zu Prüfanforderungen im Explosionsschutz durch Entwicklung und Bereitstellung von standardisierten, international anerkannten Messverfahren und Prüfeinrichtungen zur Charakterisierung von Stoffeigenschaften und Explosionsschutzmaßnahmen einschließlich der Ermittlung der Messunsicherheiten.
2. Eignungsprüfungsprogramme: Durchführung von Vergleichsmessungen zu Messgrößen, Prüfverfahren und Bestimmung von sicherheitstechnischen Kenngrößen zwecks Harmonisierung von Prüf- und Konformitätsbewertungsverfahren.
3. Sicherstellung eines weltweiten Marktzugangs für die deutsche Industrie: einerseits durch ein Dienstleistungsangebot im globalen Umfeld für Baumusterprüfungen von Geräten und Schutzsystemen sowie für die Anerkennung von Hersteller-QM-Systemen als auch die Begutachtung von Hersteller-Laboratorien, jeweils auf der Basis gesetzlicher Regelungen bzw. internationaler Zertifizierungssysteme und andererseits durch Wissenstransfer zwecks Beratung von Ministerien, Aufsichtsorganen, Industrieverbänden und Wissenschaft durch die Mitwirkung bei der Regelsetzung und Normung auf nationaler, europäischer und internationaler Ebene.
4. Qualifizierung neuer Technologien: Entwicklung und Bereitstellung von innovativen Schutzkonzepten, unter Berücksichtigung der 17 SDGs (Sustainable Development Goals – Ziele für eine nachhaltige Entwicklung der Vereinten Nationen) und den daraus abgeleiteten Zukunftsthemen wie regenerative Energien, Batteriespeichersysteme, Digitalisierung oder Wasserstoff.
5. Kenngrößen und Prüfverfahren bei atmosphärischen und nicht-atmosphärischen Bedingungen: Entwicklung und Standardisierung von Bestimmungsverfahren für sicherheitstechnische Kenngrößen, die Entwicklung von Abschätz- und Berechnungsverfahren für nicht bekannte Kenngrößen und die Bewertung von Kenngrößen einschließlich der Veröffentlichung von empfohlenen Werten.
6. Modellbildung und Simulation sicherheitsrelevanter Zünd- und Verbrennungsprozesse: Die Aufgabe umfasst grundlegende Forschungsarbeiten mit dem Ziel, einen neuen Stand der Erkenntnisse/Wissenschaft zu erreichen, um die sicherheitsrelevanten Zünd- und Verbrennungsprozesse zu

verstehen und mit Simulationsverfahren beschreiben zu können.

Geplante Arbeiten und Ziele

Zu 1.

- Vereinheitlichung von Prüfkriterien und Festlegung der Messunsicherheiten bei Untersuchungen zu Zündgefahren durch verschiedene Zündquellen, z. B. statische Elektrizität, elektrische und mechanische Funken, optische Strahlung.
- Bestimmung maximaler Oberflächentemperatur explosionsgeschützter Geräte und Festlegung der Messunsicherheiten.
- Untersuchungen zu sicherheitstechnischen und metrologischen Systemeigenschaften bei der Anwendung von Wasserstofftechnologien.
- Grundlagenuntersuchungen über die Kontaktvorrichtung des IEC-Funkenprüfgerätes und Einflüsse bei der Funkenentstehung und Zusammenarbeit mit anderen Prüfstellen zur internationalen Harmonisierung von Prüfergebnissen.

Zu 2.

- Durchführung von zwei internationalen Ringvergleichen mit den Themenschwerpunkten „Explosionsdruckmessung“ und „Thermische Bewertung von Anschluss- und Verteilerkästen“ im „Ex-Proficiency-Testing-Program“.
- Durchführung von Workshops für internationale Konformitätsbewertungsstellen mit dem Ziel des Wissenstransfers auf dem Gebiet der Prüfung von explosionsgeschützten Geräten.
- Durchführung von und Teilnahme an Ringvergleichen zu sicherheitstechnischen Kenngrößen.

Zu 3.

- Nationale und internationale Gremienarbeit, mit dem Ziel der metrologisch fundierten internationalen Harmonisierung der Regulierungen im Bereich des Explosionsschutzes.
- Entwicklungsbegleitende Bewertung von innovativen Explosionsschutzkonzepten sowie von Zündschutzkonzepten außerhalb der Anwendbarkeit von internationalen Regelwerken.
- Bearbeitung von Bauartprüfungen von ex-geschützten Geräten und Komponenten gemäß der ATEX-Richtlinie 2014/34/EU und im Rahmen des IECEx-Systems.

- Kooperation mit externen Partnern (UL, NEPSI, CQM) zur Erleichterung des internationalen Marktzugangs für deutsche Hersteller.

Zu 4.

- Untersuchungen der Zündgefahren innovativer Technologien (z. B. mobiler Geräte, Batteriesysteme, Hochleistungs-LED, HF-Füllstandsmessgeräte und umrichter gespeister permanent-erregte Synchronmaschinen, Nutzung von 5G- (bzw.-6G-) Technologie in explosionsgefährdeten Bereichen).
- Forschungsarbeiten für innovative Energieversorgungskonzepte für eigensichere Stromkreise und für dynamisch reagierende Funkenerkennungs- und -abschaltbaugruppen.
- Weiterentwicklung und Validierung von Messverfahren zur Erfassung der elektrostatischen Aufladung beim Versprühen von Flüssigkeiten.
- Evaluierung der sicherheitsrelevanten Eigenschaften sowie der Effizienz von elektrochemischen Energiespeichern, innovativen Wasserstofftechnologien und regenerativen Energieträgern.

Zu 5.

- Untersuchung von Einflussgrößen und Entwicklung von Verfahren zur Bestimmung von sicherheitstechnischen Kenngrößen, z. B. von hybriden Gemischen (Mehr-Phasen-

Gemische) und des unteren Explosionspunktes bei nicht-atmosphärischen Bedingungen.

- Untersuchungen zur Druckabhängigkeit anlaufender Deflagrationen und Detonationen auf die Wirksamkeit von Flammendurchschlagsicherungen.
- Weiterentwicklung der „CHEMSAFE“-Datenbank für bewertete sicherheitstechnische Kenngrößen und der Webpage als Open-Access-Version für einen internationalen Nutzerkreis.
- Bestimmung der sicherheitstechnischen Kenngrößen für eigensichere Stromkreise für nichtatmosphärische Bedingungen bis 10 bar.

Zu 6.

- Modellbildung, Simulation und Untersuchung von besonderen Zündgefahren (z. B. zur Funkenzündung, zur elektrostatischen Aufladung bei Strömungsprozessen und von Kunststoffoberflächen und zu Zündprozessen in heißen Freistrahlen).
- Weiterentwicklung der theoretischen und rechnerischen Modellierung des Zündverhaltens eigensicherer Netzwerke.
- Simulation vom Erwärmungsverhalten von elektrischen Geräten (z. B. elektrische Antriebe, Schaltgerätekombinationen etc.) zur Bestimmung der maximalen Oberflächentemperaturen.

Themenbereich 14:

Nanometrologie

Bearbeitet in den Fachbereichen 2.4, 3.1, 3.4, 4.2, 5.1, 5.2, 5.5, 7.1, 7.2, 7.6, 8.2 und 8.4

Aufgaben

Im Themenbereich *Nanometrologie* werden Arbeiten zur messtechnischen Rückführung der Eigenschaften von Nanoobjekten sowie zum Verständnis von messtechnisch relevanten Prozessen auf der Nanoskala durchgeführt. Nanoobjekte sind durch Abmessungen im nanoskaligen Bereich definiert, d. h. von etwa 1 nm bis 100 nm in wenigstens einer Dimension. Da viele funktionale Eigenschaften von Nanoobjekten kritisch von ihren Abmessungen abhängen und diese somit für nanotechnologische Anwendungen zu kontrollieren sind, kommt der dimensionellen Charakterisierung von Nanoobjekten eine besondere Bedeutung zu. Die Arbeiten werden in Abstimmung mit Partnern durchgeführt, hierzu zählt insbesondere das Forschungszentrum LENA (Laboratory for Emerging Nanometrology) der TU BS. In komplementärer Ergänzung von LENA sowie des Rein-

raumzentrums der PTB in Braunschweig wird zurzeit ein neues Zentrum für Nanometrologie in Anbindung an das Reinraumzentrum vorbereitet. Zu diesem Zweck wird eine ausführliche Bedarfsplanung unter Einbeziehung der wichtigsten Kooperationspartner durchgeführt, die als Grundlage in die Bauplanung eingeht. Die Arbeitsbereiche sind:

1. Schaffung der wissenschaftlichen Grundlagen zum Verständnis und zur Beschreibung von messtechnisch relevanten Prozessen auf der Nanoskala. Verknüpfung der Resultate verschiedener Messverfahren zum besseren Verständnis der Messungen.
2. Sicherstellung der metrologischen Rückführbarkeit von Messverfahren, die zur Untersuchung der Eigenschaften von ungeordneten Nanomaterialien und Nanopartikeln eingesetzt werden.

3. Sicherstellung der metrologischen Rückführbarkeit von Messergebnissen an geordneten Nanostrukturen und ultrapräzisen Oberflächen.
4. Herstellung von Nanostrukturen und Nanomaterialien für metrologische Anwendungen.
5. Anwendungen von Nanotechnologie für die Metrologie.

Geplante Arbeiten und Ziele

Zu 1.

- Weiterentwicklung der Simulation der Bildentstehung an 3D-Nanostrukturen im REM.
- Rigorose Berechnung des an Nanostrukturen gebeugten Lichtes für mikroskopische sowie scatterometrische Messverfahren; Entwicklung mathematischer Verfahren zur Beschreibung stochastischer Strukturanteile und Untersuchungen zur Kohärenz und Depolarisation bei der Müller-Ellipsometrie.
- Grundlagenuntersuchungen zur Nutzung inelastischer, nichtlinearer, quantenoptischer oder resonanter nano-optischer Prozesse zur optischen Messung von Nanostrukturen im tiefen Sub-Wellenlängenbereich.
- Nutzung und Verbreitung kristalliner Normale für die Nanometrologie; Beispiele sind speziell präparierte, monoatomare Si-Oberflächenstufen sowie große glatte Probenbereiche von bis zu einigen 100 μm Durchmesser; Anwendung präparierter Si-Kristallgitter-Normale mit ideal rechteckigem Querschnittsprofil als Strukturbreitennormale für die Halbleiterindustrie.
- Das Si-Kristallgitter wird ebenso bei der Weiterentwicklung der Röntgeninterferometrie in Kombination mit optischer Interferometrie und Rastersondenmikroskopie für die hochpräzise Positionsbestimmung an Nanostrukturen metrologisch genutzt (CCL-GD-MeP-1).

Zu 2.

- Das für die rückführbare Größenbestimmung an einzelnen Nanopartikeln entwickelte TSEM-Messverfahren wird für komplexere Nanopartikel weiterentwickelt (nichtsphärische Partikelformen, Agglomerate, polydisperse Größenverteilungen, Rußnanopartikel, Fasern).
- Entwicklung und Anwendung von Machine-Learning-Methoden zur automatischen Extraktion funktionsrelevanter Merkmale von Nanopartikeln aus elektronenoptischen Aufnahmen.
- Das für die rückführbare Größenbestimmung an Nanopartikel-Ensembles in wässriger Lösung angewandte Messverfahren der Röntgenkleinwinkelstreuung (SAXS) mit Synchrotronstrahlung wird für verschiedene Aufgabenstellungen weiterentwickelt, insbes. für die Größenbestimmung von nicht-sphärischen Nanopartikeln, für die Konzentrationsbestimmung von Nanopartikeln und für Nanopartikel unter dem Einfluss externer Felder.
- Entwicklung von Verfahren zur Bestimmung der Größe und

Anzahl von luftgetragenen Nanopartikeln sowie entsprechender Aerosol-Partikel-Normale (Ag-Partikel ($\geq 5 \text{ nm}$) aus Nukleationsprozessen).

- Entwicklung von anwendungsnäheren Referenz-Nanopartikeln zur Verbesserung der Rückführbarkeit und Vergleichbarkeit der hauptsächlich eingesetzten Messverfahren.
- Entwicklung von neuen Messverfahren zur Charakterisierung magnetischer Nanopartikel und ihrer Anwendungen in der in-vitro-Diagnostik bei bildgebenden Verfahren (Magnetic Particle Imaging) und für die Tumorthherapie (Magnetic Drug Targeting, Magnetische Thermoablation).

Zu 3.

- Weiterentwicklung von Methoden zur Bestimmung von Strukturabmessungen mittels AFM und SEM, abgestützt auf Referenzstrukturen, die mittels TEM kalibriert werden (CCL-GD-MeP-2).
- Weiterentwicklung von Verfahren der Tomografie und zugehöriger Positioniersysteme.
- Entwicklung von rückgeführten optischen Messtechniken zur Bestimmung der Form von optisch glatten Flächen wie z. B. Planflächen, Sphären, Asphären und Freiformflächen.
- Die Weiterentwicklung scatterometrischer Verfahren (DUV, EUV, Röntgenbereich) und der spektroskopischen Müller-Ellipsometrie umfasst Arbeiten zur rückgeführten Charakterisierung von 2D- und 3D-Strukturen mittels Scatterometrie sowie von Nanostrukturen mittels Müller-Ellipsometrie.
- Entwicklung einer abbildenden (ortsaufgelösten) Müller-Ellipsometrie zur Charakterisierung von Defekten und lokalen Variationen in dünnen Schichten und koordinierten Nanosystemen sowie zur besseren Verknüpfung von höchstauflösenden lokalen und integralen Messverfahren.
- Entwicklung von markerfreien und rückgeführten überauflösenden Mikroskopieverfahren für technische Anwendungen.
- Für die Bestimmung von Schichtdicken im nm-Bereich mittels optischer Ellipsometrie (inkl. Müller-Ellipsometrie), Röntgenreflektometrie und Röntgenspektrometrie werden Rückführungsketten für die geforderten Sub-nm-Messunsicherheiten entwickelt, u. a. auch für Messungen auf Si-Kugeln.
- Entwicklung hybrider Messverfahren zur elementspezifischen Charakterisierung von 3D-Strukturen durch Verbindung von EUV- und Röntgenstreuung mit Röntgenspektrometrie.
- Zur materialspezifischen Analytik von Nanoobjekten wird die Methode der referenzprobenfreien Röntgenfluoreszenzanalyse mittels Synchrotronstrahlung weiterentwickelt und angewandt, insbes. auch für Batteriematerialien und Aero-sole.
- Optimierung der Methode der Nanoindentation zu kleineren Kräften im nN-Bereich und zu kleineren Indentations-tiefen im pm-Bereich.
- Weiterentwicklung von rückführbaren Steifigkeitskalibrierverfahren mit einer Messunsicherheit von bis zu 5 %

für weiche Cantilever mit Steifigkeiten von 500 mN/m bis herab zu 5 mN/m.

Zu 4.

- Herstellung von Nanostrukturen mit optimierten Verfahren der Elektronenstrahlolithografie und Dünnschichttechnologie für die Anwendung in der elektrischen Quantenmetrologie, der dimensionellen, mechanischen und optischen Messtechnik und der chemischen Analytik.
- Herstellung von Hybridstrukturen aus metallischen und magnetischen NP zur kombinierten, immunchemischen Selektion und oberflächenverstärkten Detektion, z. B. von Biomolekülen.
- Herstellung von nanostrukturierten Präzisionsoberflächen mittels mechanischer Bearbeitungsmethoden zur Anwendung als Referenznormale in der Nanometrologie.
- Weiterentwicklung der MEMS-basierten Referenzfedern und Sensoren zur In-situ-Bestimmung der Antastkraft und Wechselwirkung zwischen Spitze und Oberfläche bei der nanomechanischen Rasterkraftmikroskopie und Nanoindentation.

Zu 5.

- Entwicklung von messtechnischen Anwendungen, die durch Verfahren der Nanotechnologie erst ermöglicht oder zumindest optimiert werden, z. B. der oberflächenverstärkten Raman-Spektroskopie (SERS).
- Weiterentwicklung der partikel- und substratbasierten SERS-Methoden sowie der IR-Nahfeld-Nanospektrometrie für die chemische und biochemische Analytik.
- Entwicklung nanoskaliger Auflösungsnormale für analytische Messmethoden und Mikroskopieverfahren.