

In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

(ausführlich im Web-Jahresbericht unter www.ptb.de)

Grundlagen der Metrologie

Radiometrische Charakterisierung einer „Laser-Driven Light Source“

Laser-Driven Light Sources (LDLS) finden mehr und mehr Verbreitung als intensive Breitbandquellen, deren spektrale Strahlstärke die von Deuteriumlampen um einige Größenordnungen übertrifft. Sie basieren auf einer Xenon-Plasmaentladung, die von einem IR-Laser getrieben wird. Eine solche Quelle wurde nun rückführbar auf das primäre Strahlernormal BESSY II im Spektralbereich von 170 nm bis 400 nm radiometrisch charakterisiert und ihre Eignung als TransfERNormal untersucht. (R. Thornagel, FB 7.1, reiner.thornagel@ptb.de)

VDI/VDE-Richtlinie „Röntgenoptische Systeme“ vollständig erschienen

Die VDI/VDE-Richtlinie 5575 ist nun mit insgesamt 10 Blättern vollständig erschienen. Neben dem federführend in der PTB entstandenen Blatt 1 zu Grundlagen und Begriffen behandelt Blatt 2 allgemeine Messverfahren, während sich die nachfolgenden Blätter jeweils mit einzelnen Röntgenoptiken wie Spiegeln, Gittern, Monochromatorkristallen, Kapillaren, Transmissions- und Reflexionszonenplatten, refraktiven Linsen und Filtern befassen. (M. Krumrey, FB 7.1, michael.krumrey@ptb.de)

An der Oberfläche des neuen Kilogramms

Auf den hochreinen Silizium-Kugeln für die Neudefinition der Einheit Kilogramm haben Oberflächeneffekte wie die sich ausbildenden Oxid- und Kontaminationsschichten einen Einfluss auf die Masse und das Volumen und damit auf die Dichte der Kugel. Um die Oberfläche mit kleinsten Unsicherheiten charakterisieren zu können, wurde an der *Metrology Light Source* eine Anlage zur kombinierten Röntgenfluoreszenz- und Photoelektronenspektroskopie aufgebaut und in Betrieb genommen. (M. Kolbe, FB 7.1, michael.kolbe@ptb.de)

Wirkungsquerschnitte für Photoionisation im VUV-Spektralbereich

In Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik in Freiburg wurde zur Bestimmung atomarer Photoionisationsquerschnitte an der *Metrology Light Source* eine Doppelionisationskammer mit Synchrotronstrahlung eingesetzt. Der Schwerpunkt der Messungen lag auf

der Rückführbarkeit, um verlässliche Daten für die Gasanalytik zu generieren. (A. Gottwald, FB 7.1, alexander.gottwald@ptb.de)

Abschluss des EMRP-Projektes Q-AIMDS

Im Jahr 2016 wurde das EMRP-Projekt „Chemical metrology tools for manufacture of advanced biomaterials in the medical device industry“ (Q-AIMDS) erfolgreich abgeschlossen. Ziel war es, mittels FTIR- und Röntgenspektrometrie Beschichtungen funktionelle Oberflächen und Kontaminationen sowie Defektstrukturen von passiven Medizinprodukten im Herstellungsprozess zu identifizieren und zu analysieren. Außerdem wurde Röntgen- und FTIR-Spektrometrie mit Raman-Spektroskopie, SIMS und XPS kombiniert, um Referenzmessverfahren und Standards für den Einsatz in der Herstellung zu qualifizieren. (B. Pollakowski, FB 7.2, beatrix.pollakowski@ptb.de)

Untersuchung der Medikamentenaufnahme von Biofilmen mittels Synchrotronstrahlung

Bei dem in diesem Jahr gestarteten EMPIR-Projekt „Quantitative measurement and imaging of drug-uptake by bacteria with antimicrobial resistance“ ist die PTB mit der Untersuchung von Biofilmen und Bakterien mittels Synchrotronstrahlung beteiligt. Mithilfe von Terahertz-, Infrarot- und Röntgenstrahlung soll die Aufnahme von antibakteriellen Stoffen in Biofilmen und Bakterien untersucht werden. Ziel dieses Projektes ist es, quantitative Methoden zu entwickeln, die orts aufgelöste Informationen ermöglichen, um die Resistenzmechanismen von Biofilmen besser zu verstehen. (C. Streeck, FB 7.2, cornelia.streeck@ptb.de)

Effiziente Biodiagnostik mittels SEIRA-Methodik und Synchrotronstrahlung

Es wurde ein effizientes Biodiagnostik-Verfahren entwickelt, das die oberflächenverstärkte Infrarotabsorption (SEIRA) mittels Au-Nanoteilchen ausnutzt. Gleichzeitig erlaubt die hohe Brillanz der IR-Synchrotronstrahlung des Speicherrings *Metrology Light Source* in Kombination mit einem Detektor-Array eine effiziente simultane Aufzeichnung von über 1000 Spektren, die automatisiert statistisch ausgewertet werden können. (A. Hornemann, FB 7.2, andrea.hornemann@ptb.de)

Erste Beobachtung von Plasmonsignaturen in zweilagigen MoS₂-Schichten

Die Untersuchung von Transportphänomenen in 2D-elektronischen Materialien, wie MoS₂, erfordert üblicherweise deren Kontaktierung mittels Nanolithografie. Dies verursacht jedoch Verunreinigungen und beeinflusst die Transporteigenschaften. Mittels Nano-FTIR können diese Untersuchungen kontaktlos vorgenommen werden, was an der *Metrology Light Source* in Zusammenarbeit mit der FU Berlin erstmalig an MoS₂-Schichten demonstriert werden konnte. Dabei wurde in zweilagigen MoS₂-Schichten eine Kopplung von Plasmonmoden mit Oberflächenphononen des SiO₂-Substrates beobachtet. (B. Kästner, FB 7.2, bernd.kaestner@ptb.de)

EMRP-Projekt „New Standards and Traceability for Radiometry – NEWSTAR“ erfolgreich abgeschlossen

Ziel des europäischen Forschungsprojekts war, die Berechenbarkeit der spektralen Empfindlichkeit von speziell zu diesem Zweck hergestellten Silizium-Photodioden – sogenannten Predictable Quantum Efficient Detectors (PQEDs) – zu verbessern sowie die Anwendbarkeit dieser Detektoren in der Radiometrie und Photometrie zu demonstrieren. Die hochpräzisen radiometrischen Charakterisierungsmessungen an den PQEDs, die in der PTB erfolgten, führten dazu, dass die Berechnung der spektralen Empfindlichkeit dieser Detektoren mithilfe von dreidimensionalen Softwaremodellen deutlich verbessert werden konnte. Als wesentlicher Simulationsparameter der Photodioden wurde die Oberflächenrekombinationsrate erkannt. Diese detektorspezifische Größe kann an geeigneten Proben bestimmt werden. Damit ist eine weitere notwendige Bedingung für die Verwendung von PQEDs als Detektorprimärnormal erfüllt worden. (L. Werner, FB 7.3, lutz.werner@ptb.de)

Hochgenauer Vergleich von Strahlungsdetektoren

Unsicherheiten von unter 10 ppm wurden bei dem Vergleich von Detektoreigenschaften an einem neuentwickelten Messplatz für die radiometrische Charakterisierung von Halbleiterdetektoren erreicht. Es können Detektoren hinsichtlich ihrer relativen spektralen Empfindlichkeit und auch bezüglich der Linearität und Ortsabhängigkeit ihrer relativen spektralen Empfindlichkeit extrem genau verglichen werden. Die Detektoren können an Luft, unter Vakuum oder Schutzgasatmosphäre sowie bei Temperaturen bis hinunter zu -196 °C betrieben werden. Die hier gewonnenen Ergebnisse sind besonders geeignet, die Vorhersage von berechneten

Detektoreigenschaften durch den Vergleich zwischen Detektoren, die sich nur in einem Parameter unterscheiden, zu überprüfen. (I. Müller, FB 7.3, ingmar.mueller@ptb.de)

Humboldt-Stipendiat entwickelt neuartigen IR- und THz-Detektor

Gefördert durch ein dreijähriges Humboldt-Stipendium hat ein Stipendiat vom NIST mit der PTB einen neuartigen thermischen Empfänger mit ausgerichteten Kohlenstoff-Nanoröhrchen als sehr schwarzen Absorber für IR- und THz-Strahlung entwickelt und mit dem THz-Laser der PTB radiometrisch charakterisiert. (J. Hollandt, FB 7.3, joerg.hollandt@ptb.de)

Bestimmung der Boltzmann-Konstante an der PTB mit einer Unsicherheit von 1,9 ppm

Abschließende Messungen mit dem Dielektrizitätskonstanten-Gasthermometer (DCGT) haben einen Wert für die Boltzmann-Konstante k mit einer relativen Messunsicherheit von 1,9 Millionstel (1,9 ppm) ergeben. Dieser letzte Schritt konnte nur durch Verbesserung der verwendeten Kondensatoren und insbesondere durch die hochgenaue Messung ihrer elastischen Eigenschaften erreicht werden. Das DCGT ist nach der akustischen Gasthermometrie die Methode mit der geringsten Unsicherheit für die Bestimmung von k . Damit ist auch die Bedingung des Konsultativkomitees für Thermometrie (CCT) erfüllt, k unter Anwendung von zwei fundamental unterschiedlichen Methoden mit Messunsicherheiten jeweils unter 3 ppm zu bestimmen. Einer Neudefinition der Basiseinheit Kelvin über die Festlegung der Boltzmann-Konstante steht nichts mehr entgegen. (C. Gaiser, FB 7.4, christof.gaiser@ptb.de)

Präzisionsensor für Absolutmessungen von Schallgeschwindigkeiten

Ein neuartiges Sensorkonzept ermöglicht absolute Schallgeschwindigkeitsmessungen auf Basis der Flugzeitmethode mit bisher unerreicht geringen Messunsicherheiten. Der Sensor besitzt als Besonderheit zwei Reflexionsebenen, wodurch für jeden ausgesandten Puls zwei Echos entstehen. Durch die so ermöglichte Differenzmessung zwischen den beiden Echos sind die Modelle für Korrekturen einfach. Zahlreiche Messungen im Temperaturbereich von 0 °C bis 80 °C bei Drücken bis zu 60 MPa in korrosiven und elektrisch leitfähigen Flüssigkeiten haben die Qualität und die Vorzüge des Sensors bestätigt. Für Reinstwasser konnten so neue Referenzdaten gewonnen werden. (F. Fehres, FB 7.4, felix.fehres@ptb.de)

Einfluss von Verunreinigungen auf die Temperatur des Zink-Fixpunkts bei 419,5 °C

Der Einfluss von Verunreinigungen mit typischen Konzentrationen von einigen 10 ppb (10^{-8}) ist für viele Temperaturfixpunkte der dominierende Messunsicherheitsbeitrag. Aufbauend auf rückgeführten chemischen Analysen mittels Glimmentladungs-Massenspektrometrie durch Partnerinstitute (BAM, NRC), wurden in der PTB Dotierexperimente für alle relevanten Verunreinigungsspezies durchgeführt. Im Ergebnis konnte eine zehnfache Verbesserung des diesbezüglichen Unsicherheitsbeitrags (jetzt $< 50 \mu\text{K}$) für den Zink-Fixpunkt erreicht werden. (S. Rudtsch, FB 7.4, steffen.rudtsch@ptb.de)

Neubestimmung thermodynamischer Temperaturen zwischen 20 mK und 700 mK

Zur Umsetzung der „Mise en Pratique“ für das Kelvin nach der erwarteten Neudefinition der Temperatureinheit im Jahr 2018 wurden im Rahmen des EMRP-Projekts „Implementing the new kelvin – InK“ thermodynamische Temperaturen im Tieftemperaturbereich neu bestimmt. Dies erfolgte im Vergleich von drei verschiedenartigen und neu entwickelten Primärthermometern an der PTB und am VTT-MIKES in Kooperation mit der Aalto Universität Helsinki und der Royal Holloway University London. Die Messungen bestätigen die thermodynamische Korrektheit der PLTS-2000 im genannten Temperaturbereich mit einer Messunsicherheit von nicht mehr als 0,5 %. Im gerade begonnenen EMPIR-Nachfolgeprojekt InK-2 soll jetzt der Temperaturbereich der Messungen mit den weiter verbesserten Primärthermometern bis hinunter zu 1 mK ausgedehnt werden. (J. Engert, FB 7.4, jost.engert@ptb.de)

Metrologie für die Wirtschaft

Fortsetzung der Zusammenarbeit mit der Carl Zeiss SMT GmbH

Die seit 1998 bestehende Kooperation mit der Firma Carl Zeiss SMT GmbH auf dem Gebiet der EUV-Radiometrie wurde in einem 8. Nachtrag bis Ende 2020 verlängert. Sie bildet die Grundlage einer wichtigen Dienstleistung der PTB für die deutsche und europäische Halbleiter-Industrie bei der Entwicklung der EUV-Lithografie. Neben der EUV-Reflektometrie und -Detektorradiometrie beziehen sich die messtechnischen Weiterentwicklungen insbesondere auf die EUV-Scatterometrie in einem inzwischen deutlich größeren Kreis von Kooperationspartnern. (F. Scholze, FB 7.1, frank.scholze@ptb.de)

Untersuchung alternativer Membranen als Pelli- kel für die EUV-Lithografie

Im Rahmen des Projektes „Seven Nanometre Technology“ (SeNaTe) unter dem EU-Programm Horizont 2020 im ECSEL-Call 2014-2 „Innovation Actions“ wurden mit EUV-Strahlung Membranen untersucht, die als Alternative zu Silizium-Membranen als Pelli-
kel (Schutzfilm) für Photomasken in der EUV-Lithografie eingesetzt werden sollen. Ziel ist es, Membranen mit sehr hoher Transmission für die EUV-Strahlung zu finden, die gleichzeitig in der harten Umgebung einer EUV-Belichtungsmaschine eine große Lebensdauer haben. (F. Scholze, FB 7.1, frank.scholze@ptb.de)

Neuartige verspannte Germanium-Zinn-Legierungsschichten auf GaAs-Oberflächen

In Zusammenarbeit mit dem Halbleiterforschungsinstitut IMEC aus Belgien wurden röntgenspektrometrische Untersuchungen zu neuartigen Oberflächenpassivierungsverfahren für GaAs-Oberflächen durchgeführt. Mithilfe von sich selbst organisierenden Molekülen im Herstellungsverfahren entstehen nanoskalige, thermisch stabile, verspannte Germanium-Zinn-Legierungsschichten. (P. Hönicke, FB 7.2, philipp.hoenicke@ptb.de)

Technologietransfer eines hochempfindlichen Messverstärkers

Der Technologietransfer des Ultrastable Low-Noise Current Amplifier (ULCA) zur Firma Magnicon wurde erfolgreich abgeschlossen. Zunächst wird die erste Gerätegeneration vermarktet, die in den Jahren 2012 bis 2015 in enger Zusammenarbeit mit der Abteilung 2 der PTB zur Marktreife entwickelt wurde. Es liegen bereits fünf Bestellungen vor. Die Entwicklung einer zweiten, weiter verbesserten Gerätegeneration wird voraussichtlich bis Ende des Jahres 2016 abgeschlossen sein. Nach einer ca. einjährigen Erprobungsphase im Praxistest in der PTB sowie im Rahmen des EMPIR-Projektes e-SI-Amp ist deren Markteinführung für Ende 2017 geplant. (D. Drung, FB 7.2, dietmar.drung@ptb.de)

Ammoniak-Wärmerohr-Flächenstrahler für bildgebende IR-Messsysteme

Ein neuartiger Ammoniak-Wärmerohr-Flächenstrahler wurde in Zusammenarbeit mit dem Institut für Kernenergetik (IKE) der Universität Stuttgart konzipiert und am IKE gefertigt. Mit einem Durchmesser von 260 mm ist dieser auch im Vakuum anwendbare Flächenstrahler eine sehr isotherme, großflächige Strahlungsquelle für Strahlungstemperaturen von -60 °C bis 50 °C in einem Spektralbereich von $1 \mu\text{m}$ bis $50 \mu\text{m}$. Bei der Anwendung

des Ammoniak-Wärmerohr-Flächenstrahlers als Kalibrierstrahler insbesondere für bildgebende Infrarotdetektor-Systeme werden Messunsicherheiten von weniger als 100 mK erreicht. (B. Gutschwager, FB 7.3, berndt.gutschwager@ptb.de)

Entwicklung und Spezifizierung eines cosinusgetreuen Messkopfes für Infrarot-Wärmestrahlung

Im Rahmen einer Kooperation mit der Bundesvereinigung der Firmen im Gas- und Wasserfach e. V. wurden für die vorgesehene Neufassung der europäischen Normen DIN EN 416-2 und DIN EN 419-2 die darin enthaltenen Spezifikationen für einen breitbandigen Infrarot-Detektormesskopf zur Messung der Wärmestrahlung von großflächigen Infrarot-Heizstrahlern grundlegend überprüft und überarbeitet. Der aus einem thermischen Detektor und einer goldbeschichteten Ulbrichtkugel bestehende Messkopf wurde durch die auf radiometrische Messungen an Prototypen gestützte, systematische Anpassung der technischen Spezifikationen zur Oberflächenstrukturierung und Beschichtung der Ulbrichtkugel so optimiert, dass seine herstellerunabhängige Fertigung mit einem reproduzierbaren und cosinusgetreuen Ansprechverhalten deutlich verbessert wurde. (R. D. Taubert, FB 7.3, dieter.taubert@ptb.de)

Hochtemperatur-Emissionsgradmessplatz weiterentwickelt

Der weltweit einzigartige Hochtemperatur-Emissionsgradmessplatz der PTB wurde durch ein induktives Heizkonzept mit dem Ziel erweitert, die Unsicherheitsbeiträge zu reduzieren, die aus der heißen Probenumgebung eines konventionellen Rohrofens resultieren. Darüber hinaus wurde eine spektral aufgelöste Emissionsgradmessung im Bereich von 500 nm bis 1100 nm durch ein charakterisiertes Array-Spektrometer ermöglicht. Erste Messungen an isostatisch gepresstem Graphit zeigen sehr gute Ergebnisse. (D. Urban, FB 7.3, david.urban@ptb.de)

THz-Detektoren erfolgreich entwickelt und weltweit vermarktet

In einem durch das zentrale Innovationsprogramm Mittelstand (ZIM) des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie geförderten Kooperationsprojekt „Hochempfindliche Detektoren für den THz- und Mikrowellenbereich“ wurden mit einem deutschen Detektorhersteller großflächige und genau kalibrierbare THz-Detektoren entwickelt, die nun, von der PTB kalibriert, bereits weltweit in vielen Forschungsinstituten für genaue THz-Leistungsmessungen eingesetzt werden. (A. Steiger, FB 7.3, andreas.steiger@ptb.de)

Wichtige Schwarzlacke hochgenau vermessen

Der spektrale Emissionsgrad von sehr schwarzen Oberflächen ist eine wichtige technische Größe, wenn die genaue Bestimmung von Strahlungstemperaturen oder auch des Energietransports über Strahlung erfolgen soll. An der PTB wurden die spektralen Emissionsgrade von technisch relevanten Schwarzlacken für die Strahlungsthermometrie und die Erdfernerkundung sehr genau bestimmt und die Ergebnisse veröffentlicht. (A. Adibekyan, FB 7.3, albert.adibekyan@ptb.de)

Verbesserte Kalibriermöglichkeiten für Thermoelemente am Palladium-Schmelzpunkt bei 1553 °C

Im Rahmen einer Zusammenarbeit mit dem South China National Centre of Metrology wurden in der PTB 15 Miniaturtiegel aus drei verschiedenen keramischen Materialien sowie zwei verschiedenen Designs mit hochreinem Palladium als Fixpunktmaterial gefüllt und metrologisch untersucht. Die erzielten Ergebnisse zeigten eine Übereinstimmung der Schmelztemperaturen aller Fixpunkte innerhalb eines Temperaturintervalls von $\pm 0,25$ K. Gleichzeitig konnte die Lebensdauer der Miniaturfixpunktzellen auf Basis des neuartigen Designs, der optimierten Füllprozedur und der Festlegung validierter Prozessparameter gegenüber den bisher verwendeten Miniaturfixpunktzellen erheblich um den Faktor 5 verlängert werden. (F. Edler, FB 7.4, frank.edler@ptb.de)

Nicht-konventionelle Pt/Rh-Legierungen für den Hochtemperaturbereich

Konventionelle Pt/Rh-legierte Thermoelemente der Typen S, R und B werden seit Jahrzehnten zur Messung von Temperaturen oberhalb von 1000 °C verwendet, obwohl durch die selektive Oxidation von Rhodium thermoelektrische Instabilitäten auftreten. Ihre Legierungen wurden eher intuitiv auf der Basis verfügbarer Materialien gewählt und sind nicht das Resultat einer Optimierung ihrer thermoelektrischen Eigenschaften. Dieses Ziel hat sich das EMPIR-Projekt „Enhancing process efficiency through improved temperature measurement“ gesetzt. Die PTB und das NPL führen Alterungsuntersuchungen (> 6000 h) an verschiedenen nicht-konventionellen Pt/Rh-Legierungen durch, um driftarme Thermoelementkombinationen für Temperaturen um 1500 °C zu entwickeln. Unterstützt werden diese Anstrengungen durch das neuseeländische Metrologie-Institut MSL, an dem Studien zur thermoelektrischen Homogenität dieser Pt/Rh-Legierungen durchgeführt werden. Erste Ergebnisse zeigen, dass Kombinationen von Legierungen exi-

stieren, die eine nahezu driftfreie Temperaturmessung erlauben. (F. Edler, FB 7.4, frank.edler@ptb.de)

DKD-Fachbegutachterworkshop für Temperaturmessgrößen

Derzeit sind 94 Kalibrierlaboratorien für Temperaturmessgrößen akkreditiert. Während der vergangenen Jahre hat sich gezeigt, dass aufgrund der zunehmenden Variabilität bezüglich Kalibrierverfahren und -gegenständen eine enge Abstimmung der Fachbegutachter erforderlich ist, um die Einheitlichkeit bei Akkreditierungsvorgängen sicherzustellen. Daher wurde in Kooperation zwischen PTB/DKD und der DAkkS im Oktober 2015 ein zweitägiger Workshop für Fachbegutachter für Temperaturmessgrößen durchgeführt. Aufgrund der sehr positiven Rückmeldungen und des nach wie vor hohen Fortbildungs- und Abstimmungsbedarfs wird zukünftig jährlich ein solcher Workshop in Berlin stattfinden. (S. Rudtsch, FB 7.4, steffen.rudtsch@ptb.de)

Bestimmung thermophysikalischer Eigenschaften von Gasen für die Energiewende

Das an der PTB perfektionierte Dielektrizitätskonstanten-Gasthermometer (DCGT) wird in einer erweiterten Variante zur Anwendung gebracht. Ziel ist es, mit einer Kombination von DCGT und Expansionstechniken Messungen von Realgaseigenschaften durchzuführen. Neben den klassischen können damit auch die dielektrischen Wechselwirkungen bestimmt werden. Die Apparatur wird zunächst an Edelgasen erprobt, um im Anschluss daran Gasgemische zu untersuchen. Im Fokus stehen dabei Wasserstoff-Methan-Mischungen, die im Zuge der Energiewende beim Einspeisen von regenerativ erzeugtem Wasserstoff ins Erdgasnetz entstehen. Die bestimmten Stoffdaten sind vor allem für eine genaue Abrechnung, aber auch für die fundierte Aufstellung von Zustandsgleichungen notwendig. (C. Günz, FB 7.4, christian.guenz@ptb.de)

Patentanmeldungen für das laseroptische Normal

Die durchgeführten Arbeiten am laseroptischen Normal haben zu drei Patentanmeldungen geführt. Zwei Anmeldungen sind der Anwendung der Laser-Doppler-Anemometrie (LDA) zuzuordnen. Eine neuartige Methode zur Rekonstruktion des Messvolumens an einem Target ermöglicht es, die Kalibrierkonstante des LDA-Messvolumens direkt am Ort der Anwendung zu überprüfen, ohne auf ein externes Geschwindigkeitsnormal angewiesen zu sein. Ein weiteres Verfahren, basierend auf der Auswertung des Strahlverlaufs nach Durchgang durch

den optischen Zugang, ermöglicht es, Geometrie und optische Eigenschaften des optischen Zugangs messtechnisch zu erfassen und damit die relative Position des Messvolumens mit kleiner Unsicherheit festzulegen. Eine weitere Anmeldung ist auf dem Gebiet der Konstruktion hydraulischer Armaturen erfolgt. Es wurden konstruktive Maßnahmen zur passiven Selbstentlüftung von strömungstechnischen (Schauglas-) Armaturen im Betrieb entwickelt und in einem Prototyp realisiert. (M. Juling, FB 7.5, markus.juling@ptb.de)

Optimierung von hybriden CFD-Methoden für die numerische Simulation komplexer Rohrströmungen

In zahlreichen Vergleichen zwischen CFD-Simulationen und laser-optischen Experimenten wurde festgestellt, dass die heute dem Industrie-Standard entsprechenden RANS-Turbulenzmodelle bei Strömungen mit starker Ablösung oder großen Sekundärkomponenten schlechte Ergebnisse erzielen. Aus diesem Grund werden zurzeit hybride Simulationsmethoden, bestehend sowohl aus RANS als auch aus skalen-auflösenden Grobstrukturmodellen, untersucht und für Rohrströmungsprobleme optimiert. Damit konnten bisher gute Ergebnisse bei Störkörper-Simulationen erreicht werden. (M. Straka, FB 7.5, martin.straka@ptb.de)

Gekoppeltes numerisches und laseroptisches Messverfahren zur Vor-Ort-Kalibrierung von Wärmehählern

Das Verfahren ermöglicht es, die Strömungsgeschwindigkeit in einer Rohrleitung entlang eines diametralen Pfades im laufenden Betrieb zu messen und daraus unter Annahme einer Rotations-symmetrie den Volumenstrom zu bestimmen. Bei asymmetrischer Anströmung ist die Bestimmung des Durchflusses auf Basis eines Pfades fehlerbehaftet. Zur Abschätzung und Verringerung dieser Fehler sowie zur Ausweitung des Einsatzgebietes wurde das Verfahren durch numerische Strömungssimulationen erweitert. Die kombinierte Methode wurde anhand von Messdaten hinter verschiedenen gekrümmten Rohrgeometrien am Prüfstand erfolgreich angewendet und validiert. (A. Weissenbrunner, FB 7.5, andreas.weissenbrunner@ptb.de)

Volumetrischer Prüfstand für Glykol-Wassergemische

Im Rahmen eines Gemeinschaftsprojekts der PTB mit dem VDDW (Verband der deutschen Wasser- und Wärmezählerindustrie e. V.) und der ARGE Heiwako (Arbeitsgemeinschaft Heiz- und Wasserkostenverteilung e. V.) werden Durchflusssensoren

für Anwendungen wie die Solarthermie und die Kältetechnik messtechnisch überprüft. Die Sensoren zeigen allesamt Abweichungen außerhalb üblicher Verkehrsfehlergrenzen für Wasser, welche jedoch sehr gut reproduzierbar sind. Damit bilden sie eine ausgezeichnete Grundlage für medienspezifische Korrekturen am Sensor. Dies konnte am Beispiel eines Geräts gezeigt werden, welches für einen Dynamikbereich von 1 : 100 und Temperaturen von 20 °C bis 80 °C Abweichungen unterhalb von 2 % aufwies. (S. Baack, FB 7.5, sebastian.baack@ptb.de)

Metrologie für die Gesellschaft

Multilayer-Spiegel für das Wasserfenster

Multilayer-Spiegel für die Mikroskopie von organischen Substanzen in wässriger Umgebung im Spektralbereich von 2,3 nm bis 4,3 nm weisen oft signifikante Reflexionsverluste auf. Im Rahmen einer Doktorarbeit wurden im PTB-Laboratorium bei BESSY II nun komplementäre Messmethoden mit Synchrotronstrahlung entwickelt, mit denen sich Rauheit und Interdiffusion in den Schichtsystemen der Spiegel als mögliche Verlustursachen eindeutig unterscheiden lassen. (A. Haase, FB 7.1, anton.haase@ptb.de)

Charakterisierung des zeitlichen Ansprechverhaltens eines Röntgendetektors

Der Neutron Star Interior Composition Explorer (NICER) soll 2017 auf der Internationalen Raumstation eingesetzt werden, um die Rotation von Neutronensternen im Röntgenbereich mit hoher zeitlicher Auflösung zu beobachten. Für die Charakterisierung des zeitlichen Ansprechverhaltens von NICER mit Synchrotronstrahlung wurde im PTB-Laboratorium bei BESSY II nun erstmals die Zeitstruktur des Speicherrings mit der Umlauffrequenz von 1,25 MHz genutzt, um gleichsam einen Pulsar zu simulieren. (M. Krumrey, FB 7.1, michael.krumrey@ptb.de)

Untersuchung der chemischen Bindung von Chlorophyll in Flüssigkeit

In Zusammenarbeit mit der Technischen Universität Berlin konnte erstmalig das Magnesium-Zentralatom von Chlorophyll a mit NEXAFS in flüssiger Umgebung untersucht werden. Passend zu den Experimenten konnten mithilfe theoretischer Simulationen die an den beobachteten Übergängen beteiligten Molekülorbitale der Bindung des Magnesiumzentralatoms zum organischen Ringmolekül bestimmt werden. (C. Streeck, FB 7.2, cornelia.streeck@ptb.de)

Erster Meilenstein in der End-to-End-Kalibrierung des NDMC erreicht

Das Network for the Detection of Mesospheric Change (NDMC) beobachtet langfristige Temperaturentrends in der oberen Atmosphäre. Das von der PTB in Zusammenarbeit mit dem DLR entwickelte Kalibrierkonzept soll dem NDMC den Nachweis von Temperaturentrends von 1 K/Dekade ermöglichen. Ein wichtiger Teil dieses Konzepts, das Near Infrared Radiation Transfer Radiometer (NIRTR), wurde gemeinsam vom Niederländischen Metrologie-Institut (VSL) und der PTB entwickelt, gefertigt und kalibriert. Das hochempfindliche Radiometer erfüllt die geforderten Spezifikationen in Bezug auf das Signal-Rausch-Verhältnis, den Size-of-Source-Effekt und die Langzeitstabilität bei der Messung von Strahldichten kleiner als $350 \text{ Wm}^{-1}\text{sr}^{-1}\text{m}^{-2}$ bei einer Wellenlänge von $1,55 \mu\text{m}$. (M. Reiniger, FB 7.3, max.reiniger@ptb.de)

Verbesserte Rückführung des GLORIA-Spektrometers

Die im europäischen Forschungsprojekt „Metrology for Earth Observation and Climate 2“ in Zusammenarbeit mit der Universität Wuppertal verbesserten Referenzschwarzkörper für die Rückführung der Hyperspektralkamera GLORIA wurden an der PTB unter stratosphärischen Bedingungen charakterisiert und kalibriert. Die Schwarzkörper zeigen unter Verwendung eines monolithischen, mit Drahterosion gefertigten Pyramidenfeldes, hochgenau kalibrierter Pt100-Sensoren und einer optimierten Elektronik nun eine um den Faktor 10 verbesserte Temperaturhomogenität von 33 mK bei einer Temperatur von -30 °C . (C. Monte, FB 7.3, christian.monte@ptb.de)

Untersuchung der Strömungsprofilabhängigkeit von Haushaltszählern

Der Strömungszustand in einer geschlossenen Rohrleitung der Dimension DN 15 wurde nach einer Änderung des Rohrdurchmessers (Sprung) anhand von Stereoscopic Particle Image Velocimetry (SPIV) und Computational Fluid Dynamics (CFD) untersucht. So konnten die Änderungen des Strömungsprofils, die ein Haushaltszähler im Einbauzustand erfährt, festgestellt werden. Dabei wurden deutliche Auswirkungen auf die Strömung durch die Änderungen des Rohrdurchmessers nachgewiesen. Hierbei konnten mithilfe der SPIV erstmalig zeitlich und räumlich hoch aufgelöste Messungen in dieser Rohrdimension stattfinden. Mittels der hier gesammelten Erkenntnisse wurden in Folgeuntersuchungen die Messabweichungen realer Zähler

aufgrund dieses Einflusses bestimmt und beurteilt. (T. Eichler, FB 7.5, thomas.eichler@ptb.de)

Internationale Angelegenheiten

Untersuchung der resonanten inelastischen Röntgenstreuung an Ammoniumnitrat

In Kooperation mit dem NIST wurden bei BESSY II am Plangittermonochromatorstrahlrohr der PTB für Undulatorstrahlung RIXS-Spektren von Ammoniumnitrat mithilfe eines kalibrierten wellenlängendispersiven Gitterspektrometers aufgenommen und mit OCEAN-Rechnungen verglichen. Hierbei konnte ein Schema zur Erklärung von Lebensdauererweiterungen in σ -Zuständen bestätigt werden. (R. Unterumsberger, FB 7.2, rainer.unterumsberger@ptb.de)

Internationaler Ringvergleich zur Schichtdickenbestimmung von Nano-Schichten

Nano-Schichten aus der Halbleiterindustrie werden immer dünner und haben einen komplexen Aufbau aus verschiedenen nano-skaligen Schichten. Hierzu wurde ein internationaler Ringvergleich vom taiwanesischen Forschungsinstitut ITRI (Industrial Technology Research Institute) organisiert, der die Ergebnisse von Röntgenfluoreszenz- und Röntgenreflektometriemessungen berücksichtigt. Mitarbeiter der AG *Röntgenspektrometrie* haben bei BESSY II durch eine referenzprobenfreie Quantifizierung relevanter Massendepositionen durch Röntgenfluoreszenzanalyse erfolgreich zu dieser Vergleichsstudie beigetragen. (P. Hönicke, FB 7.2, philipp.hoenicke@ptb.de)

Internationale Standardisierung für SQUID-Sensoren beginnt

Das Fachgebiet der supraleitenden Elektronik ist neben supraleiter-basierten Energie- und Magnettechnologien ein wesentlicher Sektor der angewandten Supraleitung. Auf Initiative des Technischen Komitees 90 „Supraleitung“ der International Electrotechnical Commission (IEC) und unter Beteiligung der PTB in der beauftragten Arbeitsgruppe ist jetzt als erste maßgebliche Aktivität zur Standardisierung in der Kryoelektronik die Ausarbeitung des Internationalen Standards „IEC 61788-22-1: Supraleitung – Teil 22-1: Supraleitende elektronische Bauelemente“ erfolgt. Der Standard beinhaltet allgemeine Terminologien und Spezifikationen für verschiedene supraleitende Sensoren und Detektoren, seine Veröffentlichung wird im April 2017 erfolgen. Unter den supraleitenden Sensoren und Detektoren haben SQUID-Sensoren derzeit die höchste kommerzielle und metrologische Bedeutung. Die PTB hat deshalb

die weitere Erarbeitung von Charakterisierungsvorschriften für SQUID-Sensoren und die Durchführung von ersten Vergleichsmessungen initiiert. (J. Beyer, FB 7.2, joern.beyer@ptb.de)

SQUID-Messplatz für die Kooperation mit dem NIM China

Im Berichtszeitraum wurde auf der Grundlage einer Kooperation zwischen der PTB und dem NIM, dem Nationalen Metrologischen Institut Chinas, ein Messplatz zur Charakterisierung von SQUIDs eingerichtet und den Kollegen aus dem NIM übergeben. Kernstück des Messplatzes ist ein an der PTB gefertigter Messstab mit einer Blei/Messing-Abschirmung, mit dem SQUIDs in einer ein- oder zweistufigen Anordnung in flüssigem Helium bei der Badtemperatur von 4,2 K charakterisiert werden können. Inzwischen wird der Messplatz am NIM erfolgreich genutzt, um eigenentwickelte SQUIDs mit supraleitenden – normaleitenden – supraleitenden (SNS) Tunnelkontakten mit NbSi als Barriere zu charakterisieren. (S. Bechstein, FB 7.2, sylke.bechstein@ptb.de)

Empfehlungen für die Darstellung der ITS90 mit Platinthermometern

Die online publizierte Broschüre „Guide to the realization of the ITS90“ enthält Empfehlungen des Konsultativkomitees für Thermometrie (CCT) zur Darstellung der Internationalen Temperaturskala ITS90 auf höchstem metrologischen Niveau. Im für die Industrie wichtigen Temperaturbereich von 25 K bis 1235 K erfolgt die Darstellung mithilfe von Präzisions-Platin-Widerstandsthermometern. Die auf der Basis neuester Erkenntnisse abgestimmten Empfehlungen erlauben, die Temperaturmessung mit Platin-Thermometern international noch besser zu vereinheitlichen und insbesondere die Abschätzung der Messunsicherheit zu vervollkommen. (B. Fellmuth, FB 7.4, bernd.fellmuth@ptb.de)

TEMPMEKO-Konferenz in Polen

Für die Temperaturmetrologen besonders bedeutsam war die alle 3 Jahre stattfindende Konferenz „International Symposium on Temperature and Thermal Measurements in Industry and Science“, kurz TEMPMEKO. Im Juni 2016 trafen sich in Zakopane, Polen, 370 führende Wissenschaftler aus 46 Ländern und diskutierten in über 380 Beiträgen u. a. neue Entwicklungen auf dem Gebiet der Skalendarstellung und Weitergabe, der Entwicklung neuartiger Sensoren und der neuen Definition des Kelvins. Die Thermometriker aus dem Fachbereich 7.4 *Temperatur* waren an 19 Beiträgen ihrer internationalen Bedeutung entsprechend beteiligt. Direkt

im Anschluss an die Konferenz fanden zahlreiche Satellitentreffen der Arbeitsgruppen des Konsultativkomitees für Thermometrie (CCT) statt. (J. Fischer, FB 7.4, joachim.fischer@ptb.de)

Information zur Neudefinition der Temperatureinheit Kelvin veröffentlicht

Das Konsultativkomitee für Thermometrie (CCT) hat eine kurze, allgemeinverständliche Information zur für das Jahr 2018 erwarteten Neudefinition der Temperatureinheit Kelvin auf der Webseite des BIPM veröffentlicht (www.bipm.org/en/committees/cc/cct/publications-cc.html). Diese Information wurde in der Thermometrie-Arbeitsgruppe für das Internationale Einheitensystem (CCT TG-SI) unter der Leitung der PTB erarbeitet und fasst die wesentlichen Vorteile der neuen Definition zusammen: Neue primäre Temperaturmessmethoden werden erlaubt, jedoch behalten die bisherigen Thermometerkalibrierungen ihre Gültigkeit. Die Unsicherheit der Temperaturmessung kann durch innovative Methoden kontinuierlich verbessert und an den zukünftigen Stand der Technik angepasst werden, ohne dass eine weitere Änderung der Definition des Kelvins notwendig wird. Damit ist die neue Definition besonders universell und zukunftsicher. (J. Fischer, FB 7.4, joachim.fischer@ptb.de)

Empfehlungen für den Gebrauch von Gasreibungsvakuummetern bei internationalen Vergleichen

Gemeinsam mit der Arbeitsgruppe „Druck und Vakuum“ des CCM hat die PTB Empfehlungen für den Gebrauch von Gasreibungsvakuummetern bei internationalen Vergleichen ausgearbeitet. Gasreibungsvakuummeter („Spinning rotor gauges“) werden als Transfer- und Bezugsnormale von 10^4 Pa bis 1 Pa eingesetzt, weil sie langzeit- und transportstabil sind, wenn entsprechende Vorkehrungen getroffen werden. Unter anderem wird empfohlen, den Rotor des Gasreibungsvakuummeters unter Vakuum zu versenden und mit einem Federmechanismus, der zuerst von der PTB entwickelt wurde, zu fixieren. (K. Jousten, FB 7.5, karl.jousten@ptb.de)