

Jahresbericht 2008 der Abteilung 7

In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

Grundlagen der Metrologie

Metrology Light Source (MLS):

Primäres Strahlernormal: Die Instrumentierung für die Messung aller für die Berechnung der Strahlstärke der MLS nach der Schwinger-Theorie benötigten Speicherringparameter wurde erfolgreich in Betrieb genommen. Die Bestimmung dieser Parameter mit kleiner Unsicherheit ist die Grundvoraussetzung zum Betrieb der MLS als berechenbare Strahlungsquelle. Der Elektronenstrom wurde über mehr als 11 Dekaden kontrolliert eingestellt und gemessen. Bei Strömen unterhalb von ca. 1 nA erfolgte die Strommessung durch das Zählen einzelner Elektronen. Die Energie der gespeicherten Elektronen wurde mit der Methode der Compton-Rückstreuung von Laserphotonen im gesamten Bereich der Elektronenenergien von 105 MeV bis 630 MeV bestimmt. Erste Messungen mit unabhängig kalibrierten Filterradiometern am MLS-Weißlichtstrahlrohr zeigten eine sehr gute Übereinstimmung. (R. Klein, FB 7.1, roman.klein@ptb.de)

UV- und VUV-Radiometrie gestartet: In Berlin-Adlershof ist Anfang des Jahres 2008 das Strahlrohr für Detektorkalibrierung und Reflektometrie im UV- und VUV Spektralbereich vom Elektronenspeicherring BESSY II in das Willy-Wien-Laboratorium transferiert und dort an der Metrology Light Source (MLS) erfolgreich in Betrieb genommen worden. Nach dem Commissioning im April wurden bereits umfangreiche Messungen im Rahmen von Dienstleistungen und verschiedenen Forschungskooperationen durchgeführt. Das Programm für den Auf- und Ausbau von UV- und VUV-Radiometrie wird in den Jahren 2009 und 2010 fortgesetzt mit der Nutzung der MLS als Primärnormal für die Kalibrierung von Strahlungsquellen und mit der Erschließung von Undulatorstrahlung hoher Intensität und Polarisation. (M. Richter, FB 7.1, mathias.richter@ptb.de)

Polarisationsmessungen von VUV-Strahlung: Im Rahmen einer Diplomarbeit an der Fachhochschule für Technik und Wirtschaft (FHTW) in Berlin wurde ein polarisationsempfindlicher Detektor für VUV-Strahlung entwickelt und an der Metrology Light Source getestet und eingesetzt. Die dadurch erweiterten Messmöglichkeiten für polarisationsempfindliche UV- und VUV-Reflektometrie mit kleinen Unsicherheiten wurden anschließend bei der Untersuchung von Dünnschichtpolarisatoren im Rahmen einer Forschungskooperation mit dem Institut d'Optique in Palaiseau (Frankreich) eingesetzt. (A. Gottwald, FB 7.1, alexander.gottwald@ptb.de)

Größenbestimmung von Nanopartikeln mit Röntgenkleinwinkelstreuung

Im Rahmen des neuen EMRP-Projekts ‚Nanoparticels‘ sollen Größe und Größenverteilung von Nanopartikeln rückführbar mit verschiedenen Methoden im Laboratorium der PTB bei BESSY II mit Röntgenkleinwinkelstreuung (small angle X-ray scattering, SAXS) bestimmt werden. Für erste Messungen mit Teilchendurchmessern zwischen 100 nm und 200 nm konnte der Durchmesser bereits mit der vorhandenen Instrumentierung bestimmt werden. Um auch Teilchendurchmesser bis hinunter zu 10 nm bestimmen zu können, wurde eine Vereinbarung mit dem Helmholtz-Zentrum-Berlin (HZB, früher Hahn-Meitner-Institut) geschlossen, die den Einsatz der SAXS-Anlage des HZB im PTB-Laboratorium bei BESSY II ermöglicht. Die Anlage beinhaltet u. a. einen wesentlich größeren ortsauflösenden Detektor (Durchmesser 160 mm statt 30 mm) und ermöglicht eine deutlich größere Variation des Detektorabstands von der Probe. (M. Krumrey, FB 7.1, michael.krumrey@ptb.de)

Methodischer Vergleich zwischen hochauflösender Röntgenemissions- und absorptionspektroskopie

Um das Speziationspotential hochauflösender Röntgenemissions- und Absorptionsspektroskopie zu qualifizieren, wurden systematische Untersuchungen an verschiedenen Titanverbindungen durchgeführt. Komplementäre Messungen in den Spektralbereichen weicher und harter Röntgenstrahlung ergaben ein umfassendes Bild über die spezifischen Vorteile der einzelnen Methoden und belegen die analytische Informationstiefe, die sich durch eine Kombination beider Ansätze ergibt. (B. Beckhoff, FB 7.1, burkhard.beckhoff@ptb.de)

Bestimmung atomarer Fundamentalparameter mittels hochauflösender

Röntgenemissionsspektrometrie

Am Plangittermonochromator-Strahlrohr für Undulatorstrahlung der PTB bei BESSY II wurde eine Spektrometereinheit für weiche Röntgenstrahlung (<2 keV) erfolgreich auf ihre spektrale Empfindlichkeit und ihr Ansprechverhalten charakterisiert. Damit konnten erste atomare Fundamentalparameter wie z. B. Übergangswahrscheinlichkeiten für die quantitative Beschreibung der Nickel L-Fluoreszenzstrahlung mit kleinen relativen Unsicherheiten ermittelt werden. (B. Beckhoff, FB 7.1, burkhard.beckhoff@ptb.de)

VUV-Kalibrierungen im Weltall

Mit der NASA-Raketenmission EUNIS (Extreme Ultraviolet Normal Incidence Spectrometer) wurden seit 2006 wiederholt Sonnenbeobachtungssatelliten im Weltraum recalibriert, mit denen die von der Sonne emittierte VUV-Strahlung quantitativ untersucht wird, etwa in Hinsicht auf deren Einfluss auf die höheren Erdatmosphärenschichten und das globale Klima. Die rückführbare Kalibrierung des EUNIS-Instrumentes selbst erfolgt dabei regelmäßig auf den von der PTB als primäres Strahlernormal genutzten Speicherring BESSY II und am Rutherford Appleton Laboratory (RAL) über Hohlkathodenstrahler als Transfornormale. Der große Erfolg der EUNIS-Missionen basiert großen Teils auf der hochwertigen Charakterisierung des

Instrumentes, wie sie zuletzt im Mai 2008 im Rahmen einer Kooperation zwischen PTB und RAL durchgeführt wurde. (W. Paustian, FB 7.1, wolfgang.paustian@ptb.de)

Kalibrierung der Radiometric Calibration Spectral Source für das James Webb Space Telescope

Das James Webb Space Telescope (JWST) soll als Nachfolger des Hubble-Weltraumteleskops 2013 in Dienst gestellt werden. Eines der wissenschaftlichen Instrumente des JWST ist NIRSpec, ein im nahen Infrarot von 0,7 μm bis 5 μm spektral auflösendes Teleskop für extrem schwache Strahlungsquellen, wie z.B. Planeten in anderen Sonnensystemen. NIRSpec soll mit einer speziellen Strahlungsquelle, der Radiometric Calibration Spectral Source (RCSS) kalibriert werden. In einem Projekt mit der Firma EADS Astrium GmbH zur Kalibrierung der RCSS hat die PTB ein Kalibrierkonzept für Strahlungsquellen mit sehr geringem Photonenfluss ($< 10^7$ Photonen $\mu\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$) unter Weltraumbedingungen entwickelt. Dazu wurden der Strahldichtekomparator-Messplatz und der Messplatz mit reduziertem Strahlungshintergrund der PTB weiterentwickelt und ermöglichen nun eine Rückführung weltraumgestützter Infrarot-Teleskope auf die radiometrischen und thermometrischen Primärnormale der PTB. (D. Taubert, C. Monte, FB 7.3 dieter.taubert@ptb.de, christian.monte@ptb.de)

Messungen der spektralen Empfindlichkeit von SWAP

Im Rahmen der Kooperation mit dem Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung wurde das Flugmodell für den Sun Watcher with APS detectors and image Processing - **SWAP** – im Reflektometer der PTB im Wellenlängenbereich um 17 nm kalibriert. Damit stehen der Sonnenphysik absolute Messwerte für die Emission der Sonne im EUV mit geringen Unsicherheiten zur Verfügung. (F. Scholze, FB 7.1, frank.scholze@ptb.de)

Kalibrierung von γ -Strahlungs-Detektoren für GLAST

Am 11. Juni 2008 wurde in Cape Canaveral das Weltraumobservatorium GLAST (Gamma-ray Large Area Space Telescope) erfolgreich gestartet. Mit GLAST sollen hauptsächlich sog. Gammablitze (gamma ray bursts) untersucht werden, deren Ursache in der Verschmelzung von Neutronensternen oder der Entstehung von schwarzen Löchern liegen könnte. Die wissenschaftlichen Instrumente an Bord sind das Large Area Telescope (LAT) und der GLAST Burst Monitor (GBM). Die NaJ-Detektoren des GBM wurden durch die PTB im Bereich vergleichsweise niedriger Photonenenergien (10 keV bis 60 keV) mit Synchrotronstrahlung bei BESSY II kalibriert. (M. Krumrey, FB 7.1, michael.krumrey@ptb.de)

Neuartiger SQUID-Multiplexer

In zukünftigen Instrumenten der Röntgenastrophysik werden supraleitende Tieftemperatur-Strahlungsdetektoren benötigt. Für die Auslesung vieler dieser Detektoren sind Selektionsschaltnetze, sogenannte "Multiplexer", erforderlich. Derartige Multiplexer werden bei der Betriebstemperatur der Strahlungsdetektoren eingesetzt, typischerweise im Temperaturbereich unterhalb 1K. In der PTB wurden neue kryoelektronische Multiplexer auf der Basis von Supraleitenden Quanteninterferometern (SQUIDs)

entwickelt und hergestellt. Gegenüber dem bisherigen Stand der Technik sind diese SQUID-Multiplexer empfindlicher, schneller, kompakter und verlustleistungsrmer. Die Anwendung dieser neuen Multiplexer zur Auslesung von höchstempfindlichen supraleitenden Mikrokalorimetern für weiche Röntgenstrahlung wurde gemeinsam mit Kooperationspartnern am NASA Goddard Space Flight Center demonstriert und in einer gemeinsamen Publikation vorgestellt. (J. Beyer, AG 7.51, joern.beyer@ptb.de)

Reflexionsgraderhöhung von Röntgenspiegeln durch Kohlenstoffbeschichtung

Röntgenspiegel für den Photonenenergiebereich von 1 keV bis 10 keV können nur mit flachem Einfallswinkel der Strahlung (unter 1°) betrieben werden. Die Spiegeloberfläche ist meist mit dünnen Metallschichten (z. B. Au, Pt oder Ir) versehen, um einen hohen Reflexionsgrad zu erzielen. Allerdings liegen die M-Absorptionskanten der Metalle in diesem Energiebereich, sodass der Reflexionsgrad dort eine starke Struktur aufweist. Gemeinsam mit der European Space Agency (ESA) und dem Danish National Space Centre durchgeführte Untersuchungen haben gezeigt, dass durch das Aufbringen einer zusätzlichen dünnen Kohlenstoffschicht (5 nm bis 10 nm Dicke) der Reflexionsgrad im Bereich der Absorptionskanten wesentlich glatter verläuft und oberhalb der Kanten auch deutlich erhöht werden kann. Derartige Beschichtungen sollen daher bei Spiegeln für zukünftige Röntgenmissionen eingesetzt werden. (M. Krumrey, FB 7.1, michael.krumrey@ptb.de)

Pulsdauermessungen am Femtosekunden-Röntgenlaser FLASH

In Zusammenarbeit zwischen PTB, DESY (Hamburg), BESSY (Berlin) und der Universität Münster wurden für den Freie-Elektronen-Laser in Hamburg FLASH die weltweit ersten Pulsdauermessungen im Femtosekundenbereich an einem Röntgenlaser durchgeführt. Das Messprinzip basiert auf der Verwendung eines Autokorrektors für weiche Röntgenstrahlung und der quantitativen Untersuchung der direkten Zwei-Photonen-Doppelionisation von Helium. Erste Messergebnisse im Bereich zwischen 30 fs und 40 fs bei einer Laserwellenlänge von 24 nm bestätigen theoretische Vorhersagen. (M. Richter, FB 7.1, mathias.richter@ptb.de)

NanoSQUIDs – Magnetometer zur Detektion einzelner Spins

Im Rahmen des von der EU geförderten Projekts „NanoSpin“ entwickelt die PTB gemeinsam mit dem NPL Supraleitende Quanteninterferometer (SQUIDs) mit einem sehr kleinen Durchmesser des supraleitenden SQUID-Rings von derzeit ca. 370 nm. Die Josephson-Kontakte dieser SQUIDs, die vom NPL mittels Fotolithografie und Ionenstrahl-Ätztechnik in Niob/Wolfram-Technologie gefertigt wurden, werden durch nano-strukturierte Brücken (65 nm breit und 80 nm lang) im Niobfilm gebildet. Diese Nano-SQUIDs werden mit einem 16 SQUID Serienarray der PTB, das als Vorverstärker für das Nano-SQUID-Signal dient, in einer Flussregelschleife betrieben. Dabei wird die Betriebstemperatur des Nano-SQUIDs in einem Kryostaten mit variabler Temperatur auf eine Temperatur im Bereich zwischen 4,2 K und 12 K eingestellt. Das mit dieser Anordnung erzielte Flussrauschen entspricht einer Nachweisempfindlichkeit von ca. 2 Elektronenspins pro $\text{Hz}^{1/2}$. (Th. Schurig, FB 7.5, thomas.schurig@ptb.de)

Kernmagnetische Resonanz an ^{195}Pt

Gepulste Kernspinresonanz an Platin stellt die zur Zeit einzige zuverlässige Methode zur Bestimmung von Temperaturen unterhalb von 0,001 K dar. Ihre Anwendbarkeit bis in den Bereich der tiefsten erreichbaren Temperaturen wird lediglich durch magnetische Ordnungsphänomene des Kernspinsystems begrenzt. Um mögliche Abweichungen des Kernspinsystems vom paramagnetischen Verhalten durch kooperative Wechselwirkung zu untersuchen, wurden NMR-Messungen an angereichertem ^{195}Pt (93,52 %) bei Gleichgewichtstemperaturen bis unterhalb 100 μK durchgeführt und mit denen an natürlichem Platin mit einer Abundanz des magnetischen Isotops ^{195}Pt von 33,8 % verglichen. Die Ergebnisse zeigen eine Konstanz der Spin-Spin-Relaxationszeit des angereicherten Platins von $\tau_2 = 140 \mu\text{s}$ bis zu den tiefsten gemessenen Temperaturen und noch keine Anzeichen einer kernmagnetischen Ordnung. Der gegenüber natürlichem Platin ($\tau_2 = 1,2 \text{ ms}$) reduzierte Wert von τ_2 als auch die gemessene Abweichung der longitudinalen Magnetisierung von einem Curie-Weiss-Verhalten sind auf die Wechselwirkung der elektronischen Momente magnetischer Verunreinigungen (100 ppm Fe) mit den Kernmomenten zurückzuführen. (P. Strehlow, FB 7.5, peter.strehlow@ptb.de)

Strahlungsquellen für die Radiometrie im nahen Infrarot

Als neue Strahlungsquellen für die Radiometrie im nahen Infrarot wurden zwei Lasersysteme getestet. Das eine System, eine Eigenentwicklung eines kontinuierlich strahlenden optisch parametrischen Oszillators (cw-OPO), wurde zur Kalibrierung zweier Detektornormale, eine InGaAs- und eine Germanium-Photodiode, bei mehreren Wellenlängen zwischen 1550 nm und 1800 nm eingesetzt. Damit gelang der Nachweis, einen cw-OPO mit seiner Signal- und Idler-Strahlung in Einmodenqualität im Spektralbereich von 1400 nm bis 4000 nm für Kalibrierzwecke zu verwenden. Die zweite Strahlungsquelle, eine fasergekoppelte Weißlichtquelle, emittiert breitbandige Strahlung zwischen 450 nm und 2500 nm gepulst mit einer Pulsdauer im ps-Bereich und einer Wiederholfrequenz von 80 MHz. Mit dieser quasi-cw Weißlichtquelle wurde am gleichen Messplatz ebenfalls die spektrale Empfindlichkeit der Photodioden bestimmt. Die Kalibrierungen mit beiden Strahlungsquellen stimmen mit bisherigen Ergebnissen im Rahmen der Unsicherheiten überein, wobei für InGaAs-Photodioden eine Abweichung zwischen gepulster und kontinuierlicher Strahlung von kleiner als 5 Promille nachgewiesen wurde. (R. Müller, A. Steiger, FB 7.2, ralf.mueller@ptb.de)

Kooperation mit dem DLR zur THz-Radiometrie

Um die Strahlungsleistung von THz-Lasern rückgeführt auf das Internationale Einheitensystem SI zu messen und auf diese Weise die Leistungsempfindlichkeit von THz-Strahlungsempfängern präzise zu kalibrieren, kooperiert die PTB mit dem Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrttechnik (DLR). Nach Umbau eines Kryoradiometer-Messplatzes der PTB für die große Wellenlänge von 120 μm eines THz-Quantenkaskadenlasers des DLR, konnte die spektrale Empfindlichkeit eines pyroelektrischen THz-

Detektors erstmals gegen ein Kryoradiometer mit kleiner Messunsicherheit bestimmt werden. (A. Steiger, FB 7.2, andreas.steiger@ptb.de)

Bosonische Wechselwirkung im Helium-4-Gas

Erstmals konnte der grundsätzlich unterschiedliche Quantencharakter der beiden Isotope Helium-4 (Boson) und Helium-3 (Fermion) mit dem Dielektrizitätskonstanten-Gasthermometer in der Gasphase nachgewiesen werden. Bei Temperaturen unter 3,3 K wurde in Helium-4 eine Abweichung der molaren Polarisierbarkeit vom theoretischen Wert gemessen, die auf die Bildung von Clustern mit spezieller Wechselwirkung zwischen den Gasatomen zurückgeführt werden kann. Dass es sich dabei um bosonische Cluster handeln muss, wurde durch Messungen mit fermionischem Helium-3 Gas bestätigt, bei dem keine Veränderung der molaren Polarisierbarkeit festgestellt wurde. (Ch. Gaiser, FB 7.4, christof.gaiser@ptb.de)

Präzisionsbestimmung der molaren Polarisierbarkeit von Helium-3

Die bislang ersten Untersuchungen des Isotops Helium-3 mit dem Dielektrizitätskonstanten-Gasthermometer lieferten eine eindeutige Übereinstimmung mit den Ergebnissen thermodynamischer Temperaturmessungen mit Gasthermometern konstanten Volumens auf höchstem Niveau. So konnte die molare Polarisierbarkeit von Helium-3 erstmals mit bisher unerreichter Messunsicherheit experimentell bestimmt werden. Da in die theoretische Berechnung der Polarisierbarkeit isotopenspezifische Anteile eingehen, sind die so gewonnenen dielektrischen Daten für die Verifizierung theoretischer Modelle von großer Bedeutung. (Ch. Gaiser, B. Fellmuth, FB 7.4, christof.gaiser@ptb.de)

Oxidation von Verunreinigungen in Metallfixpunkten der ITS-90

Aktuell ist der Einfluss von Verunreinigungen in Fixpunkten der größte Beitrag zur Messunsicherheit bei der Darstellung und Weitergabe der ITS-90 im Temperaturbereich von 0 °C bis 1000 °C. Um eine entsprechende Korrektur für Konzentrationen kleiner 1 ppm durchführen zu können erachtete man es bisher als ausreichend, den entsprechenden Einfluss durch Dotierungsexperimente im Bereich von ca. 10 ppm bis 100 ppm zu ermitteln. Untersuchungen in der PTB im Konzentrationsbereich von 0,2 ppm bis 20 ppm zeigten jedoch, dass bei einer erheblichen Anzahl von binären Systemen die Verunreinigung als Oxid ausfallen kann und dadurch die Fixpunkttemperatur unverändert bleibt. Durch umfangreiche thermodynamische Berechnungen wurde eine Klassifikation für alle Systeme aus Fixpunktmetall und Verunreinigung erstellt, die eine Entscheidung über die Notwendigkeit einer detaillierten experimentellen Untersuchung des Phasenverhaltens ermöglicht und so zu einer deutlichen Reduzierung des experimentellen Aufwandes führt. (S. Rudtsch, FB 7.4, steffen.rudtsch@ptb.de)

Rückführung einer Pd-C Fixpunktzelle zur Kalibrierung von Thermoelementen auf die ITS-90

Temperaturen oberhalb der Erstarrungstemperatur von Silber (961,78 °C) sind in der ITS-90 über Strahlungsthermometer definiert. In der industriellen Praxis werden aber häufig Thermoelemente zur Messung hoher Temperaturen bis 2200 °C eingesetzt. Ihre Kalibrierung erfolgt zunehmend an eutektischen Metall-Kohlenstoff-Verbindungen in vertikal zu betreibenden Fixpunkttiegeln. Deren

Schmelztemperaturen sind entsprechend der ITS-90 mit Strahlungsthermometern zu bestimmen, die messtechnisch bedingt nur horizontal einsetzbar sind. Aus diesem Grund wurde eine konstruktiv veränderte Pd-C Fixpunktzelle ($T_S = 1492 \text{ °C}$) gebaut, die auch Messungen in horizontaler Anordnung erlaubt. Durch Vergleichsmessungen an dieser Zelle mit einem Filtrerradiometer, einem Strahlungsthermometer und einem Pt/Pd-Thermoelement wurde die Schmelztemperatur mit einer Messunsicherheit ($k = 2$) von $\pm 1 \text{ K}$ bestimmt. Damit konnte der rückführbare Kalibrierbereich für Thermoelemente von 1330 °C auf 1500 °C erweitert werden. (F. Edler, FB 7.4, frank.edler@ptb.de, K. Anhalt, FB 7.3, klaus.anhalt@ptb.de)

Berücksichtigung der Isotopenzusammensetzung bei der Definition der Basiseinheit Kelvin

Der Einfluss der Isotopenzusammensetzung auf die Temperatur des Wassertripelpunktes wurde in den vergangenen Jahren weltweit untersucht. Auf Empfehlung des Komitees für Thermometrie (CCT) hat das Komitee für Maß und Gewicht (CIPM) die für die Definition des Kelvin zu verwendende Isotopenzusammensetzung des Wassers festgelegt, was von der PTB seit dem 1.8.2008 umgesetzt wird. Gegenüber dem vorherigen nationalen Normal ergibt sich bei Anwendung der genaueren Definition ein um $68 \text{ }\mu\text{K}$ höherer Wert für den Wassertripelpunkt. Gleichzeitig reduzierte sich die Standardunsicherheit ($k=1$) für die Kalibrierung von Wassertripelpunktzellen von $54 \text{ }\mu\text{K}$ auf $29 \text{ }\mu\text{K}$. (S. Rudtsch, FB 7.4, steffen.rudtsch@ptb.de)

Metrologie für die Wirtschaft

Neue optische Materialien für die 193-nm-Lithographie

Die lithographische Herstellung der leistungsstärksten Halbleiterbauelemente beruht derzeit auf der Verwendung von ArF-Lasern bei einer Wellenlänge von 193 nm . Durch den Einsatz von Immersionsflüssigkeiten zwischen der letzten Linse der Belichtungsoptik und dem zu belichtenden Silizium-Wafer liegen die erreichbaren Strukturbreiten dabei um Faktoren unter der Belichtungswellenlänge. Bei der Verwendung optischer Materialien mit höherem Brechungsindex können Werte von 32 nm und darunter erreicht werden. An der Metrology Light Source wurde im Rahmen einer Forschungsk Kooperation zwischen der PTB und der Schott AG, einem der weltweit führenden Hersteller optischer Materialien für die 193-nm -Lithographie, die VUV-Transmission und -Reflexion hochreiner Granateinkristalle untersucht. (A. Gottwald, FB 7.1, alexander.gottwald@ptb.de)

Bestimmung von Strukturbreiten auf Halbleiterphotomasken mit EUV-Scatterometrie

Im Rahmen des erfolgreich abgeschlossenen ABBILD-Projektes des BMBF hat die PTB unter anderem die Nutzung von EUV-Scatterometrie für die Bestimmung von Strukturbreiten auf Halbleiterphotomasken untersucht. Auf einer EUV-Testmaske des AMTC wurden dazu Messungen im EUV-Reflektometer der PTB durchgeführt, die mit mathematischen Methoden des ZUSE-Institus Berlin ausgewertet wurden. Für

Testfelder mit Linienbreiten von nominell 180 nm mit einheitlichem Abstand wurde dabei eine lineare Korrelation der Ergebnisse zu Messungen des AMTC mit einem CD-SEM im Rahmen von 0,2 nm erreicht, für 140 nm breite Linien mit variierenden Abständen eine Korrelation innerhalb von 0,3 nm. Mit diesen Ergebnissen wurde gezeigt, dass die EUV-Scatterometrie in der Lage ist, die Anforderungen für die Messtechnik zukünftiger Maskentechnologie zu erfüllen. (F. Scholze, FB 7.1, frank.scholze@ptb.de)

EUV-Photosensoren für die Lithographie

Für den Betrieb einer EUV-Belichtungsmaschine sind eine Vielzahl von optischen Sensoren im Spektralbereich des EUV notwendig zur Prozessüberwachung und Justage. Im Rahmen einer wissenschaftlichen Kooperation mit dem ASML und der Universität Delft wurde die gute Eignung neuartiger Silizium-Photodioden für diesen Spektralbereich demonstriert. (F. Scholze, FB 7.1, frank.scholze@ptb.de)

Referenzprobenfreie Untersuchung von Multischichtsystemen im Nano- und Mikrometerbereich

Für ein mit einem Industriepartner durchgeführtes Vorhaben wurden anwendungsrelevante Multielementmehrfachschichtsysteme wie „Leadframes“ mittels referenzprobenfreier Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) untersucht und mit Ergebnissen des Projektpartners verglichen. Dabei wurde das bestehende Quantifizierungsmodell dahin gehend erweitert, dass auch Gradienten in der Elementzusammensetzung einer Schicht mittels RFA zuverlässig nachgewiesen werden können. (B. Beckhoff, FB 7.1, burkhard.beckhoff@ptb.de)

PTB/DKD-Richtlinie für Blockkalibratoren

Blockkalibratoren werden sowohl national als auch international in zunehmenden Maße für die Kalibrierung von industriellen Widerstandsthermometern eingesetzt. Untersuchungen der PTB und Ringvergleiche innerhalb des DKD ergaben eine zu optimistische Einschätzung der hiermit erreichbaren Messunsicherheiten durch Hersteller und Anwender und dass insbesondere Fehler durch die Wärmeableitung nicht korrekt berücksichtigt worden sind. Daraufhin erstellte die PTB eine Kalibrierrichtlinie für Blockkalibratoren, die auch als EURAMET-Richtlinie übernommen wurde. Aktuelle Untersuchungen der neusten Generation von Blockkalibratoren zeigen, dass einige Hersteller erhebliche Verbesserungen ihrer Geräte erzielen konnten, was maßgeblich auf die inzwischen einheitliche Anwendung dieser Kalibrierrichtlinie zurückzuführen ist. (S. Friederici, FB 7.4, sven.friederici@ptb.de)

Au/Pt Thermoelemente – Alternative zu Hochtemperaturwiderstandsthermometern?

Der Temperaturbereich zwischen den Erstarrungstemperaturen von Aluminium (660,323 °C) und Silber (961,78 °C) ist in der ITS-90 über Hochtemperaturwiderstandsthermometer definiert. Internationale Vergleichsmessungen (u.a. EUROMET.T- K 4) offenbarten thermische und mechanische Instabilitäten dieser Sensoren, die die angestrebten Messunsicherheiten (< 10 mK) in diesem Temperaturbereich in Frage stellen. Die ersten Ergebnisse metrologischer Untersuchungen zur thermoelektrischen Stabilität und Homogenität eines Au/Pt Thermoelements mit neuartigen Konstruktionselementen (direkt verschweißte

Messstelle, freibewegliche Thermodrähte) rücken Au/Pt Thermoelemente als mögliche kostengünstige und vor allem praktikablere Alternative zu Hochtemperaturwiderstandsthermometern ins Rampenlicht. Sehr gute thermoelektrische Stabilitäten und Homogenitäten in der Größenordnung von jeweils 10 mK bis 20 mK wurden im Ergebnis einer Alterung bei 950 °C über mehr als 500 Stunden nachgewiesen. (F. Edler, FB 7.4, frank.edler@ptb.de)

Nachweis lokaler Inhomogenitäten in Thermodrähten

Thermoelemente sind die am weitesten verbreiteten elektrischen Sensoren für Temperaturmessungen. Die größten Messunsicherheiten bei ihrem Einsatz werden durch Inhomogenitäten in den Thermodrähten verursacht. Ein Verfahren zum qualitativen Nachweis (Ortsbestimmung) und zur quantitativen Abschätzung der durch sie verursachten Messfehler ist die „Traveling heater“ Methode. Hier wird eine schmale Zonen definierter Temperaturerhöhung entlang eines einzelnen Thermodrahtes bei gleichzeitiger Temperaturkonstanz der Enden des Thermodrahtes gefahren. Dabei ist jede gemessene Änderung der Thermospannung während der Bewegung der Heizzone ein Indikator für inhomogenitätsbedingte und damit Messfehler hervorrufende parasitäre Thermospannungen. Umfangreiche Untersuchungen an Kupfer- und Platindrähten wurden vom Gastwissenschaftler Dr. Y. Abdelaziz (NIS, Kairo) durchgeführt. Lokale Inhomogenitäten in Thermodrähten konnten auf diese Weise eindeutig identifiziert und ihr Einfluss auf die Messunsicherheiten abgeschätzt werden. (F. Edler, FB 7.4, frank.edler@ptb.de)

Internationale Angelegenheiten

Draft A für CCPR-Pilotvergleich für spektrale Empfindlichkeit im EUV

Für den gemeinsam mit dem NIST und dem NMIJ unter Leitung der PTB als Pilotlabor durchgeführten CCPR-Pilotvergleich zur spektralen Empfindlichkeit im Spektralbereich von 11,5 nm bis 20 nm (extremen UV, EUV), liegt jetzt der Draft A vor. Dieser bestätigt die internationale Vergleichbarkeit der Messungen der spektralen Empfindlichkeit im Spektralbereich des EUV durch alle in diesem Bereich tätigen NMIs. (F. Scholze, FB 7.1, frank.scholze@ptb.de)

Schlüsselvergleich CCPR S1 zur spektralen Strahldichte abgeschlossen

Aufgrund der großen Bedeutung der spektralen Strahldichte für Photometrie und Radiometrie initiierte das Konsultativ Komitee für Photometrie und Radiometrie (CCPR) einen Vergleich der spektralen Strahldichte von Bandlampen im Wellenlängenbereich von 220 nm bis 2500 nm. Teilnehmer waren die Staatsinstitute LNE-INM/Cnam (Frankreich), NIST (USA), NRC (Kanada), VNIIOFI (Russland, Pilotlabor) und die PTB. In dem als Sternvergleich aufgebauten Messschema wurden Lampen der einzelnen Staatsinstitute von diesen vermessen und an das Pilotlabor (VNIIOFI) geschickt und dort ebenfalls vermessen. Der Vergleich bestätigt die Übereinstimmung der Realisierung der spektralen Strahldichte an den teilnehmenden Staatsinstituten über nahezu den ganzen Wellenlängenbereich von 220 nm bis 2500 nm auf ± 1 %. (D. Taubert, 7.3 Dieter.Taubert@ptb.de)

Dritter Internationaler Workshop zur Bestimmung der Boltzmann-Konstante

In der Tradition der vorangegangenen Workshops zum Vorhaben zur Neudefinition des Kelvin, die 2005 und 2006 in der PTB stattfanden, lud im April 2008 das französische Staatsinstitut LNE-INM/CNAM in Paris zum dritten Workshop dieser Art ein. In 15 Vorträgen wurden die Fortschritte bei der Bestimmung der Boltzmann-Konstante mit unterschiedlichen Methoden einschließlich der von der PTB verfolgten Dielektrizitätskonstanten-Gasthermometrie vorgestellt und diskutiert. Es bestehen damit gute Aussichten, bei weiter anhaltenden Fortschritten termingerecht 2010 einen verbesserten Wert der Boltzmann-Konstante vorzulegen und die Neudefinition des Kelvin in Angriff zu nehmen. (Ch. Gaiser, FB 7.4, christof.gaiser@ptb.de)

Beginn des iMERAPlus-Projekts zur Neudefinition des Kelvin

Im Anschluss an den dritten internationalen Workshop zur Bestimmung der Boltzmann-Konstante wurde mit dem kick-off meeting der Startschuss für das internationale, von der EU im 7. Rahmenprogramm in erheblichem Umfang geförderte iMERAPlus-Boltzmann-Projekt gegeben. Unter der Koordination der PTB vereint dieses Projekt die Anstrengungen verschiedener europäischer Staatsinstitute, die Präzisionsbestimmung der Boltzmann-Konstante und eine daraus resultierende Neudefinition der Basis-Einheit Kelvin, rückgeführt auf eine unveränderliche Naturkonstante, zu erreichen. (J. Fischer, FB 7.4, joachim.fischer@ptb.de)

Metall-Kohlenstoff Eutektika für eine neue Hochtemperaturskala

Die eutektischen Metall-Kohlenstoff Legierungen haben im EU geförderten Projekt *Novel High-Temperature metal carbon fixed-points for radiation thermometry, radiometry and thermocouples* (HIMERT) ihr Potential als metrologische Temperaturstandards bestätigt und sollen jetzt in eine neue Hochtemperaturskala implementiert werden. Auch hier koordiniert Europa die weltweiten Forschungen. Im EURAMET Projekt 926 übernehmen das NPL, die PTB und das LNE-INM/Cnam zusammen mit dem japanischen Staatsinstitut NMIJ die Leitung der Arbeitspakete. Das LNE-INM/Cnam und das NMIJ sind zuständig für die Erstellung der Herstellungsvorschriften für eutektische Fixpunktzellen sowie für die Untersuchung ihrer Stabilität. Das NPL und die PTB sind verantwortlich für die Messung und Zuweisung der thermodynamischen Temperaturen der Schmelzpunkte der in Frage kommenden Legierungen (Co-C, Pt-C, Re-C). Der Abschluss des Projekts und die Implementierung der Eutektika in eine neue Hochtemperatur-Skala ist für 2012 vorgesehen. (K. Anhalt, J. Hartmann, FB 7.3 Klaus.Anhalt@ptb.de)