

ABTEILUNG 7

Temperatur und Synchrotronstrahlung



Temperatur und Synchrotronstrahlung

Die Temperatur ist nicht nur Basisgröße, sondern auch eine der meistgemessenen physikalischen Größen überhaupt. Neben der Thermometrie ist eine zweite zentrale Aufgabe der Abteilung die Metrologie mit Synchrotronstrahlung im breiten Bereich von der Terahertz- bis zur Röntgenstrahlung. Außerdem werden grundlegende und angewandte Fragen der Strahlungs- und Vakuummesstechnik sowie der Wärmemengenmessung bearbeitet.

Das Kelvin

Die Temperatur bestimmt den Wirkungsgrad von Wärmekraftmaschinen und die Emission von Wärmestrahlung, und sie tritt in der statistischen Thermodynamik als Parameter von Wahrscheinlichkeitsverteilungen auf. Da praktisch alle makroskopischen physikalischen Größen, die in Industrie und Forschung von Interesse sind, mehr oder weniger stark von der Temperatur abhängen, sind sie ohne Weiteres nur vergleichbar, wenn sie bei derselben Temperatur bestimmt werden. Aus diesen Gründen gehört die Temperatur zu den meistgemessenen physikalischen Größen. Allerdings nimmt die Temperatur



Herzstück des PTB-Gasthermometers zur Neudefinition des Kelvin: Vier Druckzylinder aus Edelstahl nehmen die verschiedenen Kondensatoren zur Messung der Dielektrizitätskonstanten auf.

unter den Basisgrößen des Einheitensystems eine gewisse Sonderstellung ein, weil sie als intensive thermodynamische Zustandsgröße nicht „additiv“ ist: Die Temperatur $2 \cdot T$ lässt sich nicht dadurch herstellen, dass man zwei Systeme der Temperatur T zusammenbringt. Dementsprechend spielt in der Thermometrie die Frage eine wichtige Rolle, wie man, ausgehend von einem Temperaturwert, eine ganze Temperaturskala realisieren kann. Diese Aufgabe ist der PTB im Einheiten- und Zeitgesetz zugewiesen und sie gibt die jeweils aktuelle Temperaturskala mit kleinstmöglichen Unsicherheiten weiter. Die Temperatureinheit Kelvin (K) wird mithilfe des Temperaturintervalls zwischen dem absoluten Nullpunkt und einem geeigneten Temperatur-„Fixpunkt“ festgelegt. Als Fixpunkt wurde der Tripelpunkt des Wassers – eine jedoch eher „zufällige“ Materialeigenschaft – mit einem Temperaturwert von 273,16 K gewählt. Es ist geplant, die Temperatureinheit stattdessen mit einer fundamentalen Naturkonstante zu verknüpfen. Im Falle des Kelvin ist dies die Boltzmann-Konstante k , denn die Temperatur tritt in allen fundamentalen physikalischen Gesetzen stets in der Kombination kT als „thermische Energie“ auf. Vor einer Neudefinition des Kelvin durch Festlegung der Boltzmann-Konstanten muss diese mit ausreichend geringer Unsicherheit mit unterschiedlichen Methoden bestimmt werden. Die PTB will dieses Ziel mit verbesserter Dielektrizitätskonstanten-Gasthermometrie erreichen. ■

Temperaturmessung in Extrembereichen

Eine einheitliche Temperaturbestimmung wird durch die Festlegungen und Messvorschriften der Internationalen Temperaturskala gemäß einer Vereinbarung aus dem Jahre 1990 (ITS-90) gewährleistet. Sie reicht von 0,6 K bis zu den höchsten Temperaturen, die praktisch mit Hilfe Planck'scher Strahlung messbar sind. Die PTB stellt weltweit einmalig die Temperaturskala auch für tiefe und tiefste Temperaturen mit höchster Genauigkeit dar, gibt sie weiter und arbeitet an ihrer Verbesserung. In internationaler Kooperation wurden Messtechniken für die

Thermometrie unterhalb von 1 K entwickelt. Das Resultat ist eine neue internationale Skala für den Temperaturbereich von 1 K bis hinunter zu 0,0009 K, die PLTS-2000. Sie beruht auf dem Zusammenhang zwischen dem Schmelzdruck und der Schmelztemperatur des Helium-Isotops ^3He .

Hochtemperaturmessungen mit höchster Reproduzierbarkeit und Genauigkeit in der Prozessüberwachung gewinnen im Rahmen von Produktsicherheit und für die effiziente Ressourcennutzung zunehmend an Bedeutung. Die PTB

entwickelt im Rahmen internationaler Verbundprojekte neuartige Temperaturfixpunkte zur genauen Messung von Temperaturen oberhalb des höchsten Temperaturfixpunktes der ITS-90 bei 1358 K. Sie stellt Hochtemperaturfixpunkte, Hochtemperaturthermoelemente und thermodynamische Messverfahren im Bereich von 1400 K bis 3200 K zur Verfügung, die eine Messung hoher Temperaturen – auch in industriellen Prozessen – mit Unsicherheiten von bis zu wenigen zehntel Grad Celsius ermöglichen. ■

Wolfram-Bandlampe als Transfornormal für die Strahlungstemperatur und die spektrale Strahllichte.

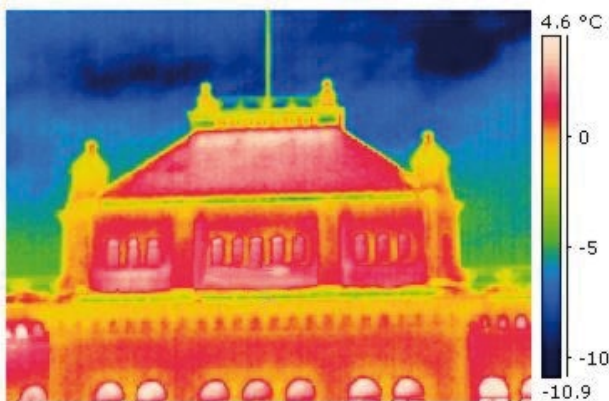


Strahlungsthermometrie – berührungslose Temperaturmessung

Eine Vielzahl von Temperaturmessverfahren basiert auf Berührungsthermometern, die mit dem Körper, dessen Temperatur bestimmt werden soll, in direkten Kontakt gebracht werden müssen. Mit optischen Strahlungsmessgeräten ist es dagegen möglich, berührungslos die Oberflächentemperatur eines Körpers zu bestimmen. Grundlage für die Strahlungsthermometrie ist die Messung der elektromagnetischen Strahlung, die jeder Körper mit einer Temperatur oberhalb des absoluten Nullpunktes aussendet (Temperatur- oder Wärme-

strahlung). Absorbiert ein Körper alle auftreffende Strahlung vollständig, nennt man ihn einen Schwarzen Körper. Sein ausgesandtes Spektrum wird durch das Planck'sche Strahlungsgesetz beschrieben.

Strahlungsthermometrie ist heute über einen Temperaturbereich von -100 °C bis 3000 °C möglich. Strahlungsthermometer reagieren sehr schnell, und die Messung wird nicht durch Wärmeleitung beeinflusst. Die Temperatur von Objekten, die sehr heiß sind, sich schnell bewegen, unter elektrischer Spannung stehen, schnelle Temperaturänderungen erfahren oder sehr weit entfernt sind, kann so gemessen werden. Damit bekommt die Infrarot-Strahlungsthermometrie auch bei der Erdfernerkundung, z.B. im Zusammenhang mit der Klima-beobachtung, zunehmende Bedeutung. Die zuverlässige Anwendung der Strahlungsthermometrie erfordert eine genaue Kalibrierung von Strahlungsthermometern und die Bestimmung des spektralen Emissionsgrads von Objekt-oberflächen. Zu diesem Zweck betreibt die Abteilung 7 Hohlraumstrahler, die in sehr guter Näherung die Strahlung eines Schwarzen Körpers bei Temperaturen von -173 °C bis zu 3000 °C aussenden. Sie ermöglichen für Anwender und Hersteller von Strahlungsthermometern die Rückführung der berührungslosen Temperaturmessung auf die Internationale Temperaturskala. ■



Thermografische Aufnahme der Kuppel des Siemensbaus der PTB Berlin.

Wärme

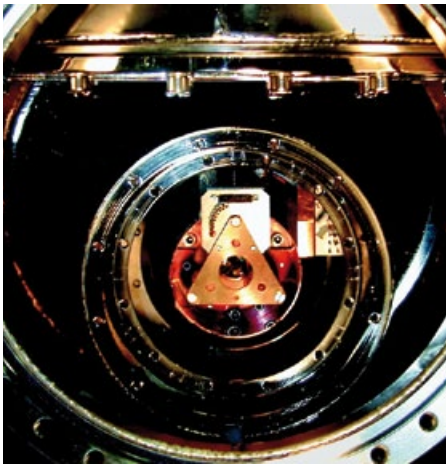
Die Steigerung der Energieeffizienz über den Weg von der Produktion in Kraftwerken, der Verteilung über Fernwärmenetze bis hin zum sparsamen Einsatz beim Verbraucher ist eine dringliche politische Vorgabe und eine technische Herausforderung mit hochgradiger wirtschaftlicher Relevanz. Die PTB hat dieses Thema schon vor vielen Jahren aufgegriffen und ist dabei, sich zu einem Zentrum für die Messung thermischer Energie in

Europa zu entwickeln. Für Konformitätsprüfungen im Rahmen der Europäischen Messgeräte-richtlinie werden Messdaten für die Beurteilung von Wärme- und Klimakältezählern erhoben. So beruhen derzeit rund 80 % der Konformitätsbestätigungen für Wärme- und Klimakältezähler in Europa auf Messungen der PTB. Außerdem werden in zahlreichen Forschungsprojekten grundlegende Fragestellungen der thermischen Ener-

giesmesstechnik untersucht. Derzeit leitet die PTB ein europäisches Forschungsprojekt zur Steigerung der Energieeffizienz von Kraftwerken, an dem sich acht weitere nationale Metrologie-Institute und große Wirtschaftsunternehmen der Energiebranche beteiligen. Wichtiges Ziel des Vorhabens ist

die Verbesserung der Rückführbarkeit der besonders relevanten Messgrößen „Durchfluss“ und „Temperatur“, für die in Kraftwerken Extrembedingungen herrschen. Hierfür sind u. a. moderne, in der PTB entwickelte Methoden der laseroptischen Strömungsmesstechnik erforderlich. ■

Detektoren für Strahlungsleistungsmessungen



Blick in das Innere eines Kryoradiometers mit der dreiecksförmigen Halterung des Strahlungsabsorbers aus Kupfer.

Vom satellitengestützten Fernerkundungsinstrument bis zur Belichtungsanlage der Halbleiterindustrie, von der Farbmessung bis zur Strahlungsthermometrie: Damit Strahlungsleistungen von Lichtquellen verlässlich gemessen werden können, muss die spektrale Empfindlichkeit von Strahlungsdetektoren bestimmt werden. Dies geschieht mit Hilfe absolut messender, primärer Empfängernormale. Die Empfindlichkeit eines Strahlungsempfängers bei unterschiedlichen Wellenlängen erhält man durch eine Vergleichsmessung (Kalibrierung) gegen ein Primärnormal oder einen bereits kalibrierten Referenzempfänger. Als Primärnormale nutzt die PTB in den Spektralbereichen von der langwelligigen Infrarot- bzw. Terahertz-Strahlung bis zur kurzwelligigen Röntgenstrahlung sogenannte Kryoradiometer, thermische Empfänger, die bei sehr tiefer Temperatur (-269 °C) betrieben werden und deren Herzstück ein Strahlungsabsorber ist. Mit diesen Kryoradiometern können bei der Strahlungsleistungsmessung kleinste relative Messunsicherheiten bis deutlich unter 0,01 % erreicht werden. Durch den Einsatz der Strahlung unterschiedlicher Quellen (Laser-, Wärme-, Plasma- oder Synchrotronstrahlung) kann die PTB über einen weiten Spektralbereich Empfängerkalibrierungen durchführen und Herstellern und Anwendern von Strahlungsdetektoren hochgenaue Empfindlichkeitsbestimmungen anbieten. ■

Synchrotronstrahlung

Synchrotronstrahlung aus Speicherringen erstreckt sich vom infraroten Spektralbereich bis in das Röntgengebiet und eröffnet somit gegenüber Hohlraumstrahlern einen um mehrere Dekaden erweiterten Bereich für die radiometrische Nutzung. Seit 1982 nutzt die PTB Elektronenspeicherringe als primäre Strahlernormale, von 1982 bis 1999 den Berliner Speicherring BESSY I, seit 1999 BESSY II und seit 2008 die Metrology Light Source (MLS). An deren Messplätzen bietet die PTB ein breites Spektrum von Dienstleistungen an, von Kalibrierungen über Auftragsforschung bis hin zu umfassenden metrologischen Systemlösungen. Arbeitsschwerpunkte sind dabei Realisierung und Weitergabe radiometrischer Einheiten unter Ausnutzung berechenbarer Synchrotronstrahlung bzw. mit Kryoradiometern als primäre Empfängernormale im UV-, VUV- und Röntgenbereich sowie die Charakterisierung und Qualitätskontrolle optischer Materialien, Komponenten und Baugruppen in diesen Spektralbereichen. Ein Fokus liegt hierbei auf dem sogenannten Extrem-UV (EUV, Wellenlänge ca. 13 nm), wo die Halbleiterindustrie aktuell Produktionsverfahren für eine neue Generation von Hochleistungsprozessoren entwickelt. Zu den Aufgaben gehören auch die Weiter- und Neuentwicklung grundlegender und angewandter metrologischer Verfahren, beispielsweise zur Bestimmung von Schichtdicken und Parti-

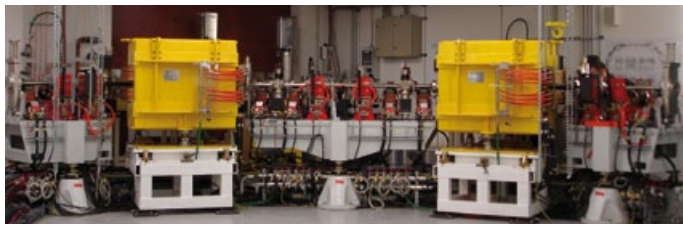
keldurchmessern im Bereich einiger Nanometer (Röntgenreflektometrie, Röntgenkleinwinkelstreuung), zur Quantifizierung von Oberflächenkontaminationen (Röntgenfluoreszenzanalyse) oder für die satellitengestützte Astronomie. ■



Das EUV-Reflektometer erlaubt die Charakterisierung von optischen Komponenten mit einer Masse von bis zu 50 kg und Durchmessern von bis zu 65 cm.

Die Metrology Light Source

Die Metrology Light Source (MLS) im Technologiepark Berlin-Adlershof ist ein in Europa einzigartiger, für die metrologische Nutzung optimierter Niederenergie-Elektronenspeicherring zur Erzeugung von Synchrotronstrahlung. Sie ermöglicht die Weiterentwicklung der Metrologie vom fernen infra-

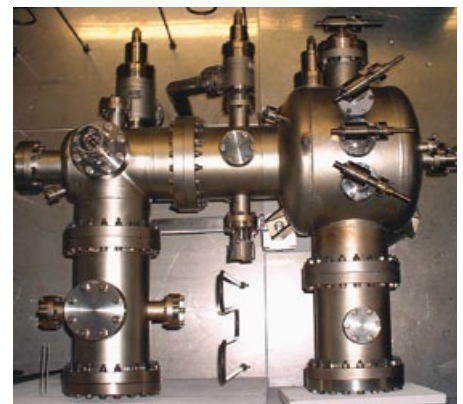


MLS-Speicherringsegment.

roten (FIR) bis zum extrem ultravioletten (EUV) Spektralbereich. Das bei der MLS geschaffene Potenzial ergänzt die beim Elektronenspeicherring BESSY II im Röntgenbereich genutzten Möglichkeiten – mit einem spektralen Überlapp im technologisch wichtigen EUV-Bereich. Das Maximum des Spektrums der Synchrotronstrahlung kann an der MLS über weite Bereiche angepasst werden, wie auch die Intensität, die über mehr als 11 Größenordnungen variieren kann. Die neuen Messmöglichkeiten erlauben es, erweiterte Aufgaben für die Kalibrierung von Strahlungsquellen durchzuführen. Ein spezieller Betriebsmodus der MLS ermöglicht die Erzeugung von kohärenter Synchrotronstrahlung und schafft beste Messmöglichkeiten im Spektralbereich von Terahertz-Strahlung. Die UV-/VUV-Radiometrie profitiert von der Nutzung intensiver und hochgradig linear-polarisierter Undulatorstrahlung. ■

Vakuum

Für viele physikalische Geräte und Experimente ist Vakuum als kontrollierte Gasatmosphäre unterhalb des umgebenden Luftdrucks eine wichtige Voraussetzung. Auch zahlreiche industrielle Fertigungsprozesse erfordern Vakuumbedingungen. Vakuummessgeräte müssen eine Bandbreite von 10^{-10} Pa bis 10^5 Pa abdecken. Die PTB kann als einziges Labor weltweit diesen Bereich zur Kalibrierung von Vakuummessgeräten abdecken. Drei verschiedene Primärnormale werden in der Abteilung 7 zur Darstellung der Druckskala im Vakuumbereich betrieben. Eine Druckwaage misst die auf einen Kolben ausgeübte Kraft durch einen Differenzdruck bis hinab zu 30 Pa. Beim statischen Expansionssystem wird eine bekannte Gasmenge in ein kleines Volumen eingeschlossen und danach in ein definiertes, größeres Volumen expandiert. Der entstehende Druck ist somit berechenbar. Dieses Verfahren besitzt eine untere Anwendungsgrenze von etwa 10^{-2} Pa. Beim kontinuierlichen Expansionssystem wird ein bekannter, sehr kleiner Gasfluss erzeugt, das Gas in ein größeres Vakuumgefäß eingelassen und über Blenden definiert abgepumpt. Dadurch werden definiert Drücke bis hinab zu 10^{-10} Pa erzeugt. Neben der Kalibrierung von Vakuummessgeräten werden auch künstliche Standardlecks, mit welchen Leckdetektoren kalibriert werden, gegenüber Vakuum und Atmosphäre vermessen. ■



Vakuumkammern des PTB-Primärnormals CE3 zur Kalibrierung von Vakuummessgeräten für Druckbereiche bis hinab zu 10^{-9} Pa.

SQUID-Messtechnik

SQUIDs (Superconducting Quantum Interference Devices) sind hochempfindliche, quantenelektronische Sensoren für nahezu alle physikalischen Größen, die sich in magnetische Signale umwandeln lassen. Moderne SQUID-Sensoren sind komplexe integrierte Schaltungen auf der Basis von dünnen Schichten supraleitender Materialien. Die SQUID-Sensoren aus der Abteilung 7 werden zum Beispiel im Biomagnetischen Zentrum der PTB in Berlin als höchstempfindliche SQUID-Magnetometer, um neue medizinische Diagnose- und Therapiemethoden zu entwickeln. In der PTB Braunschweig dienen SQUID-Magnetometer in einem Kryostromkomparator zur Kalibrierung von Widerständen mit relativen Unsicherheiten von nur

einigen 10^{-9} . Neben SQUID-Magnetometern werden zunehmend SQUID-basierte Stromsensoren in der Messtechnik verwendet, wenn bei tiefen Temperaturen kleinste Ströme gemessen werden müssen. Für derartige Messungen werden verschiedene SQUID-basierte Pikoamperemeter entwickelt, die gegenüber den magnetischen Störfeldern der Umgebung robust sind. Die Anwendungen im Bereich der Forschung sind vielseitig und reichen von der Signalverstärkung von neuartigen Tieftemperatur-Strahlungsdetektoren für Instrumente der Astrophysik und bei Experimenten zur Quantenkommunikation über den Einsatz in der NMR-Spektroskopie bis hin zur Messung kleinster magnetischer Momente von Nanopartikeln. ■

Fachbereiche und Kontakt

Abteilungsleiter

Dr. Gerhard Ulm
Telefon: (030) 3481-7312
E-Mail: gerhard.ulm@ptb.de

Fachbereich 7.1 Radiometrie mit Synchrotronstrahlung

- Röntgenradiometrie
- EUV-Radiometrie
- UV- und VUV-Radiometrie
- Synchrotronstrahlungsquellen
- Instrumentierung Berlin-Adlershof

Prof. Dr. Mathias Richter
Telefon: (030) 3481-7100
E-Mail: mathias.richter@ptb.de

Fachbereich 7.2 Kryophysik und Spektrometrie

- Supraleitungssensorik
- Kryosensoren
- Ultratiefe Temperaturen
- Kryoelektronische Messsysteme
- Röntgen- und IR-Spektrometrie
- Informationstechnik Berlin-Adlershof

Dr. Thomas Schurig
Telefon: (030) 3481-7290
E-Mail: thomas.schurig@ptb.de

Fachbereich 7.3 Detektorradiometrie und Strahlungsthermometrie

- Hochtemperaturskala
- Infrarot-Strahlungsthermometrie
- Detektorradiometrie
- Terahertzradiometrie

Dr. Jörg Hollandt
Telefon: (030) 3481-7369
E-Mail: joerg.hollandt@ptb.de

Fachbereich 7.4 Temperatur

- Hochtemperaturtechnologie
- Angewandte Thermometrie
- Grundlagen der Thermometrie
- Tieftemperaturskala

Dr. Joachim Fischer
Telefon: (030) 3481-7473
E-Mail: joachim.fischer@ptb.de

Fachbereich 7.5 Wärme und Vakuum

- Messung thermischer Energie
- Neue Verfahren der Wärmemengenmessung
- Vakuummetrologie

Dr. Thomas Lederer
Telefon: (030) 3481-7230
E-Mail: thomas.lederer@ptb.de

Die Abteilung hat ihre Aufgabenschwerpunkte in den Bereichen Thermometrie bei Temperaturen von 10 μ K bis über 3000 K und Radiometrie vom THz- bis in den Röntgenbereich. Die Messung thermischer Energie sowie Nanometrologie, Kryosensorik, Spektrometrie und Vakuummetrologie sind weitere Aufgabengebiete. Dabei wird auch die Synchrotronstrahlung der in Berlin-Adlershof gelegenen Speicherringe Metrology Light Source (MLS) und BESSY II in vielfältiger Weise genutzt. Viele Arbeiten werden im Rahmen von nationalen und internationalen Kooperationen durchgeführt. Aufgrund besonderer messtechnischer Ausstattung hat die PTB hier in einigen Fällen eine weltweite Alleinstellung mit herausragender Bedeutung für Industrie und angewandte Forschung. ■

Sekretariat

Jacqueline Steffen
Telefon: (030) 3481-7444
Telefax: (030) 3481-7503
E-Mail: jacqueline.steffen@ptb.de