



Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Nationales Metrologieinstitut

Abteilung 4 Optik



Optik

Wie spät ist es? Wie lang ist ein Meter? Wie hell ist eine LED? Aber auch: Wie stark ist ein Laser, wie messe ich einzelne Lichtteilchen, wie glatt ist ein Spiegel und wie gut ist eine Linse? Wie messe ich Höhendifferenzen weit entfernter Orte? Und: Sind die Naturkonstanten wirklich konstant? Mittels moderner optischer Methoden liefert die Abteilung Optik präzise Antworten auf diese und viele weitere Fragen.

Photometrie und Radiometrie

Die Candela

Die Candela ist die Einheit der Lichtstärke und definiert als „die Lichtstärke in einer bestimmten Richtung einer Strahlungsquelle, die monochromatische Strahlung der Frequenz $540 \cdot 10^{12}$ Hertz aussendet und deren Strahlstärke in dieser Richtung (1/683) Watt pro Steradian beträgt“. In der PTB wird die Candela mittels spektral charakterisierter Photometer realisiert und durch ein Netzwerk aus kalibrierten Spezialglühlampen bewahrt. Gleichzeitig wird intensiv an einer verbesserten radiometrischen Realisierung gearbeitet. Dazu wird ein spezieller Empfänger entwickelt, der den Übergang von der radiometrischen Strahlstärke zur Empfindlichkeit des menschlichen Auges nahezu ideal abbildet. Ein universelles, über 40 m langes Photometerbankensystem ermöglicht es, alle gerichteten photometrischen Größen mit kleiner Messunsicherheit zu bestimmen.



Teil der 42 m langen Photometerbank, die zur Realisierung und Weitergabe der SI-Basiseinheit Candela verwendet wird. Im Vordergrund wird eine Lichtstärkenormallampe betrieben, deren mechanische Ausrichtung kontrolliert wird.

bankensystem ermöglicht es, alle gerichteten photometrischen Größen mit kleiner Messunsicherheit zu bestimmen.

Photometrie

Die Photometrie behandelt mit der Augenempfindlichkeit des Menschen bewertete Messungen im Wellenlängenbereich des sichtbaren Lichtes und stellt damit einen sehr bedeutungsvollen und industrienahen Bereich der Metrologie dar. Für technische und industrielle Anwendungen sind oft Größen von Bedeutung, deren Einheiten von der Lichtstärkeinheit Candela abgeleitet werden. Die volkswirtschaftlich wichtigste Größe im Bereich der Lichttechnik ist der Lichtstrom mit seiner Einheit Lumen (lm). Er ist ein Maß für die gesamte von einer Quelle ausgesandte sichtbare Strahlung und wird daher mit der Empfindlichkeit des menschlichen Auges bewertet. Der Lichtstrom wird u. a. verwendet, um die Energieeffizienz von Lampen quantitativ zu beschreiben. In der PTB



Messplatz zur Kalibrierung von LED-Normalen für die Größen Lichtstrom, Lichtstärke, spektrale Strahlungsfunktion und aller daraus abgeleiteten farbmetrischen Kenngrößen

wird er mit einem Roboter-Goniophotometer und mit einer Ulbrichtkugel gemessen. Andere wichtige Größen, die sich in vielen Normen wiederfinden, sind die Beleuchtungsstärke mit ihrer Einheit Lux (lx) und die Leuchtdichte (cd/m^2). Sie wird z. B. zur Kennzeichnung von Displays verwendet. Unter Einbeziehung kamera- und robotergestützter Messtechnik können in der PTB auch neuartige Lichtquellen wie großflächige organische Leuchtdioden (OLED) oder Hochleistungs-LEDs bezüglich ihrer Farbe und ihres Abstrahlverhaltens gemessen werden. Zunehmend setzen sich in der Photometrie spektral aufgelöste Messtechniken durch, aus denen die integralen photometrischen Größen mathematisch bestimmt werden.

Radiometrie

Die Radiometrie behandelt die Messung elektromagnetischer Strahlung. Sie wird an der PTB in verschiedenen Teilbereichen bearbeitet.

Die Spektroradiometrie bearbeitet die Darstellung, Bewahrung und Weitergabe der radiometrischen Einheit der spektralen Bestrahlungsstärke im Spektralbereich von 200 nm bis 2500 nm. Aktuelle Schwerpunkte sind dabei die Messung hoher UV-Bestrahlungsstärken (z. B. für Wasserentkeimung und Lackhärtung) sowie die Rückführung für Messungen der terrestrischen solaren UV-Strahlung zur Bestimmung des Ozon-Gehaltes der Atmosphäre.

Die Strahlungswechselwirkung zwischen Materialoberflächen und Licht wird durch Kennzahlen wie z. B. dem Transmissions- und Reflexionsgrad beschrieben. Diese Größen werden u. a. in der Farben-, Lack- und Zuckerindustrie zur Charakterisierung



Industriesolarzelle, deren Abhängigkeit ihres Wirkungsgrads vom Spektrum und von der Richtung der Einstrahlung für das Energy-Rating bestimmt wird

der hergestellten Produkte benötigt. Zur Messung der diffusen Reflexion werden u. a. Gonioreflektometer eingesetzt, mit denen die Probenoberfläche unter beliebigen Einfallswinkeln beleuchtet und die räumliche Verteilung der reflektierten Strahlung aus beliebigen Betrachtungswinkeln aufgenommen werden kann. Die Messungen werden als Dienstleistung angeboten und können in einem

weiten Spektralbereich vom Ultraviolett bis zum Infrarot durchgeführt werden.

Der Bereich der Photovoltaik wird in der PTB kontinuierlich ausgebaut, um die Messtechnik für diese zunehmend wichtiger werdende Säule der Energieversorgung Deutschlands weiter zu entwickeln. Die PTB ist dabei eines von weltweit nur wenigen Referenzlaboratorien, die die internationale Äquivalenz der Messergebnisse in der Photovoltaik sichern. Ein neuartiger Laser-gestützter Messplatz ermöglicht nicht nur Messungen mit weltweit geringster Messunsicherheit, er eröffnet auch ganz neue Möglichkeiten in der Charakterisierung von Solarzellen hinsichtlich ihrer spektralen und winkelaufgelösten Eigenschaften. Auch wird die Metrologie hinsichtlich der Verwendung von Sonnensimulatoren bei der Solarzellen- und Solarmodulkalibrierung sowie der Bereich der Outdoor-Kalibrierungen kontinuierlich weiterentwickelt.

Die Ausrüstung der PTB im Bereich der Laserradiometrie ermöglicht es, Laserleistungsmessgeräte für industrierelevante Laser zu kalibrieren. Der Wellenlängenbereich reicht von 193 nm bis 10,6 μm , der Leistungsbereich von wenigen Mikrowatt bis zu zwei Kilowatt. Dabei können Laserstrahlungsempfänger für kontinuierliche und für gepulste Laser kalibriert werden. Einen besonderen Bereich bilden Empfänger für die optische Nachrichtentechnik bei 850 nm, 1,3 μm und 1,55 μm , die direkt an eine Glasfaser angeschlossen werden.

Die Abteilung Optik bearbeitet ebenfalls intensiv den Bereich der Quantenradiometrie, wo es um die definierte Erzeugung einzelner, zeitlich voneinander getrennt ausgesandter Lichtteilchen und ihre präzise Messung geht. Derzeit wird an der Entwicklung rückführbarer Einzelphotonenquellen hinsichtlich ihrer Verwendung als quantenbasierte Standardquellen für die Radiometrie gearbeitet. Ein moderner Messplatz ermöglicht die rückgeführte Kalibrierung von Einzelphotonendetektoren bei Photonenflüssen bis hinunter zu 1000 Photonen pro Sekunde. Weitere wichtige Anwendungen für diese neuartigen Quellen und Detektoren sind die Quantenkryptographie und die Quantenkommunikation.

Zeit und Frequenz

Die Sekunde

Die Einheit der Zeit, die Sekunde, wurde bereits 1967 über eine atomare Naturkonstante definiert. Danach ist die Sekunde das 9 192 631 770-fache der Periodendauer der Mikrowellenstrahlung, die dem Übergang zwischen den beiden Grundzustandsniveaus von Caesium (^{133}Cs) entspricht. Lange vorbei sind die Zeiten, da die Sekunde als Bruchteil (1/86400) eines „mittleren Sonnentages“ definiert und damit nicht genauer als auf relativ $1 \cdot 10^{-8}$ bekannt war. Um acht Größenordnungen genauer sind die besten Atomuhren heute; mit ähnlich kleiner Unsicherheit lässt sich keine andere SI-Einheit realisieren.

In Deutschland ist die PTB durch das Einheiten- und Zeitgesetz beauftragt, die Zeiteinheit zu realisieren und weiterzugeben. Dafür werden vier primäre Caesium-Atomuhren betrieben, von denen die gesetzliche Zeit in Deutschland abgeleitet wird.

Die genauesten Uhren sind die beiden sogenannten Fontänenuhren CSF1 und CSF2 (seit 1999 bzw. 2009 im Betrieb), die mit lasergekühlten Caesium-Atomen arbeiten. Mit diesen Atomuhren wird die Zeiteinheit Sekunde mit einer Unsicherheit von ca. $3 \cdot 10^{-16}$ realisiert. Das entspricht einer Genauigkeit von einer Sekunde in 130 Millionen Jahren. Die älteren Caesium-Atomuhren CS1 und CS2 (seit 1969 bzw. 1986 im Betrieb) arbeiten mit einem Caesium-Atomstrahl und erreichen „nur“ eine Genauigkeit von etwa einer Sekunde in 3 Millionen Jahren.

Die PTB trägt mit ihren primären Atomuhren und deren herausragender Genauigkeit zusammen mit weltweit weiteren 70 Zeitinstituten zur Realisierung der koordinierten Weltzeit UTC bei. UTC steht für ‚Coordinated Universal Time‘ und bildet die Richtschnur, an der nationale Zeitskalen, wie UTC(PTB) für Deutschland, monatlich ausgerichtet werden. Bei der Realisierung der genauen Zeit arbeitet die PTB mit den anderen Zeitinstituten zusammen. Um Uhren weltweit zu vergleichen, werden verschiedene Techniken verwendet: Empfang der Signale von Satellitennavigationssystemen wie GPS, GLONASS und Galileo oder der Austausch von Zeitsignalen über TV-Satelliten und optische Glasfasernetze.



Die primäre Caesium-Fontänenuhr CSF2 der PTB gehört zu den genauesten Uhren der Welt.

Zeitverbreitung

Die in der PTB mit Caesiumatomuhren realisierte koordinierte Weltzeit UTC(PTB) plus eine Stunde ergibt die Mitteleuropäische Zeit (MEZ), die gesetzliche Zeit in Deutschland. Vom letzten Sonntag des März bis zum letzten Sonntag im Oktober ergibt sich die Mitteleuropäische Sommerzeit (MESZ) durch UTC(PTB) plus zwei Stunden.

Die Zeitverbreitung erfolgt auf dreierlei Weise. Über den Langwellensender DCF77 der Media Broadcast GmbH in Mainflingen werden Zeitzeichen ausgesendet. Sie können im Umkreis von ca. 2000 km um den Sender zur Steuerung von Funkuhren verwendet werden. Während jeder Minute werden die Nummern von Minute, Stunde, Kalendertag, Wochentag, Kalendermonat und die beiden letzten Ziffern des Kalenderjahres übertragen. Dabei werden die Sekundenmarken durch Impulsdauer-Modulation kodiert. Das Steuersignal wird mit einer von der PTB entwickelten Steuereinrichtung am Sendeort erzeugt und von Braunschweig aus überwacht. Etwa 100 Millionen Funkuhren in ganz Europa werden auf diese Art mit der Zeit versorgt. Bei den meisten dieser Uhren genügt die Anzeige der „richtigen“ Sekunde. Energieversorger, Telekommunikationsunternehmen, Flugsicherung und viele andere synchronisieren mit dem DCF77-Signal ihre Uhren genauer als auf eine tausendstel Sekunde, wobei die Laufzeit des Sendesignals berücksichtigt wird. Darüber hinaus wird die Zeit über das öffentliche Telefonnetz mit ähnlicher Genauigkeit verbreitet. Schließlich hat sich das Internet zu einem immer wichtigeren Medium der Zeitverbreitung entwickelt: Drei Server in der PTB bedienen täglich derzeit rund 600 Millionen Abfragen mittels Network Time Protocol.

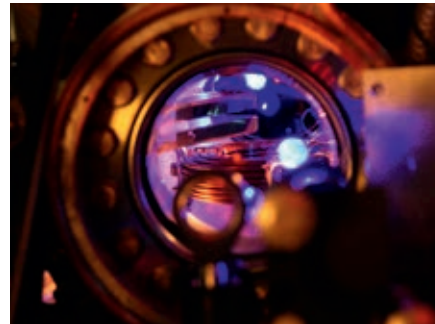
Optische Atomuhren

Bei Uhren steigen im Allgemeinen Genauigkeit und Frequenzstabilität mit höherer Frequenz des „Uhrenpendels“ an. Bei einer Caesiumatomuhr liegt sie im Mikrowellenbereich, bei optischen Uhren, bei denen Laser Übergänge in Atomen oder Ionen anregen, liegen die Frequenzen dagegen im Bereich sichtbaren Lichts. Von der um etwa fünf Größenordnungen höheren Frequenz der gegenwärtig entwickelten optischen Uhren erwartet man daher eine deutliche Verbesserung der Genauigkeit gegenüber Caesium-Atomuhren.

In der Abteilung Optik wird an verschiedenen Möglichkeiten zur Realisierung einer optischen Uhr geforscht. Da es auf dem Weg zur besten optischen Atomuhr diverse Forschungsansätze gibt, werden z. B. optische Übergänge in $^{171}\text{Yb}^+$ oder $^{27}\text{Al}^+$ Einzel-Ionen, im ^{229}Th Kern und in neutralen ^{87}Sr -Atomen, die in einem optischen Gitter angeordnet sind, untersucht.

Optische Uhren wurden erst möglich, als die Methoden der höchstauflösenden Laserspektroskopie, die Technik des Laserkühlens von Ionen und Atomen sowie die Frequenzmessung mit optischen Frequenzkämmen erfunden worden waren. Nur mit Frequenzkämmen, die mit Femtosekundenlasern erzeugt

werden, kann heutzutage die hohe Frequenz optischer Uhren im Petahertzbereich (10^{15} Hz) vergleichsweise einfach gemessen werden. Alle diese Techniken werden in der Abteilung Optik verfeinert, weiterentwickelt und in einer Reihe von Experimenten angewandt. Die bislang erreichte hohe Genauigkeit ermöglicht es sogar, fundamentale Theorien der Physik auf den Prüfstein zu stellen, so beispielsweise die grundlegende Frage zu beantworten: „Wie konstant sind eigentlich bestimmte Naturkonstanten?“, die noch immer unbeantwortet ist.



Blick in die Strontium Gitteruhr der PTB: Circa eine Million Strontiumatome werden mit Laserlicht auf Temperaturen dicht am absoluten Nullpunkt abgekühlt. Die blauen Laserstrahlen lokalisieren die Atomwolke im Vakuumgefäß, wobei die Atome zu blauer Fluoreszenz angeregt werden (Bildmitte).

Länge und Dimensionelle Metrologie

Das Meter

Die Definition des Meters aus dem Jahre 1983 verknüpft die Einheiten Meter und Sekunde über die Festlegung der fundamentalen Naturkonstanten Vakuum-Lichtgeschwindigkeit ($c_0 = 299\,792\,458$ m/s). Dieser Wert wurde zuvor mit sehr geringer Unsicherheit bestimmt. „Das Meter ist die Länge der Strecke, die Licht im Vakuum während der Dauer von $1/299\,792\,458$ Sekunden durchläuft“ – mit dieser Definition setzte sich der allgemeine metrologische Trend fort, von nicht ausreichend stabilen und genauen Artefakten Abstand zu nehmen, und Einheiten auf der Basis von Naturkonstanten zu definieren. Das Meter fällt damit in den Bereich der Optik, mit enger Verbindung zur exakten Zeit- und Frequenzmessung.



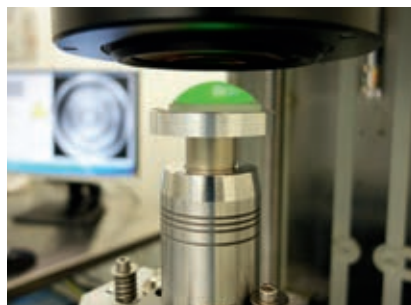
Aufbau zur Realisierung des Meters mittels Iod-stabilisierter Laser

In der PTB werden zur Realisierung der Längeneinheit Iod-stabilisierte Laser verwendet, deren Frequenz genau bekannt ist. Mit Hilfe eines Frequenzkamms lässt sich diese optische Frequenz direkt auf die gleiche primäre Caesiumatomuhr rückführen, die auch zur Realisierung der Sekunde verwendet wird. Sie erlaubt eine Längenmessung mit einer relativen Unsicherheit bis zu 10^{-12} .

Für die Weitergabe der Längeneinheit werden Wellenlängen stabilisierter Laser von Kunden aus Industrie und Forschung durch Vergleiche mit den Wellenlängennormalen der PTB oder durch optische Frequenzmessung mittels Frequenzkamm kalibriert.

Optische Formmessung

Hochgenau gefertigte optische Oberflächen sind für viele Anwendungen in Technik und Wissenschaft unverzichtbar. Die Palette reicht von kleinsten Linsen für Handykameras und asphärisch geschliffenen Brillengläsern über höchstgenau gefertigte Optiken für die Fotolithografie zur Herstellung von Computerchips bis zu sehr großen Spiegeln, die z. B. in Synchrotrons zur Strahlableitung eingesetzt werden. Die Fertigung dieser hochgenauen Oberflächenformen setzt eine entsprechend genaue Messung voraus. Bei den ebenen Flächen sind derzeit Messunsicherheiten von wenigen Nanometern gefordert. Ein in der PTB für diese extremen Genauigkeiten entwickeltes Messverfahren nutzt das bekannte optische Reflexionsgesetz und die geradlinige Ausbreitung von Licht als natürliche und hochgenaue Referenz. Glatte, spiegelnde Plan- oder Kugelflächen können auch mit Interferometern optisch abgetastet und bestimmt werden. Die PTB nimmt hier Kalibrierungen für Messgeräte der Industrie vor. Derzeitige Forschungsaktivitäten haben das Ziel, auch komplexere Oberflächenformen wie z. B. asphärische Linsen und Freiformflächen sehr genau zu messen. Zudem werden neue Messverfahren für die rückgeführte Messung



Optische Formmessung mit dem Tilted-Wave Interferometer

optischer Wellenfronten entwickelt. Die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten werden in enger Zusammenarbeit mit anderen Fachabteilungen der PTB und externen Partnern durchgeführt.

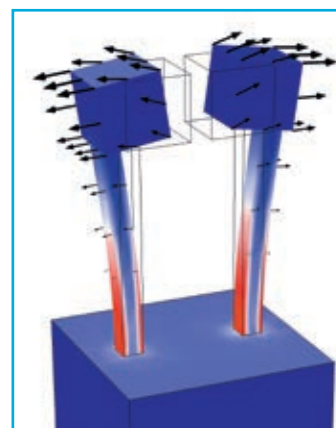
Optische Nanometrologie

Nanostrukturen haben sich schon längst in unserem täglichen Leben etabliert. Zum Beispiel bestehen die Bauteile moderner Elektronik aus Strukturen, die zum Teil nur einige 10 Nanometer groß sind. Im Herstellungsprozess müssen sie mit einer Genauigkeit von wenigen Nanometern gefertigt und gemessen werden. Da solche Strukturen deutlich kleiner als die Wellenlänge des zur Messung verwendeten Lichtes sind, stoßen hier die herkömmlichen mikroskopischen Verfahren an ihre Grenzen. Zur genauen Messung der Geometrie periodischer Strukturen wird die Oberfläche mit einem Laser beleuchtet. Aus der Winkelverteilung und den Intensitäten des gebeugten Lichtes lassen sich Größe und Form der Gitterstrukturen bestimmen. Mithilfe dieser

Technologie wird das Messen von Gitterstrukturen ohne abbildendes Objektiv möglich. Dieses Verfahren kann auch für Gitterstrukturen mit Gitterperioden unterhalb der halben Wellenlänge eingesetzt werden: Obwohl in diesen Fällen keine Beugung stattfindet, kann man aus den polarisationsabhängigen Reflexionseigenschaften die Strukturgrößen bestimmen. So ist man für zukünftige Aufgaben der Industrie und die immer feiner werdenden Strukturen der neuen Chiptechnologie gut gerüstet.

Metrologie für funktionale Nanosysteme

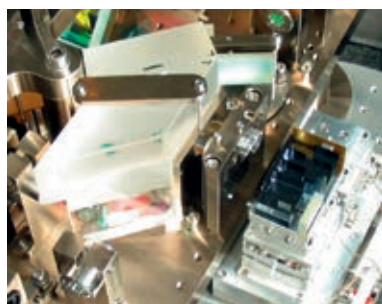
Nanoskalige Systeme mit Strukturdimensionen von wenigen 10 nm bis wenigen 100 nm ermöglichen optische Eigenschaften und Funktionalitäten, die mit makroskopischen Systemen nicht zugänglich sind. Beispielsweise kann durch Nanostrukturen die effektive Laufzeit von Licht in Materie um ein Vielfaches erhöht werden. Die Nachwuchsgruppe „Metrologie für funktionale Nanosysteme“ erforscht funktionale nanooptische Systeme für Anwendungen in Sensorik und Hochpräzisionsmetrologie. Schwerpunkte bilden zum



Strahlungsdruckinduzierte mechanische Deformation zur Lichtmodulation in Siliziumnanostrukturen mit hohem Aspektverhältnis

einen die Erhöhung der Licht-Materie-Wechselwirkung für optische Messsysteme (z. B. Polarimetrie) und dimensionelle Metrologie. Zum anderen werden rauscharme mikro- und nanooptische Systeme für die optische Hochpräzisionsmetrologie sowie dafür relevante Materialeigenschaften wie z. B. mechanische Verluste, Photoelastizität und Wärmeleitfähigkeit in Nanosystemen untersucht.

Röntgenoptik



Kombiniertes Röntgen- und optisches Interferometer der PTB zur Messung des Gitterparameters von isotonenangereichertem Silizium-28

Röntgenstrahlen haben eine sehr viel kürzere Wellenlänge als sichtbares Licht und sind in der Lage, Materie zu durchdringen. Damit sind sie ideal zur Messung von ultrakurzen Abständen innerhalb von Festkörpern geeignet. Mit Röntgeninterferometern kann man

den Abstand der Atome im Kristallgitter oder die Wellenlänge von Röntgenstrahlung in der Längeneinheit Meter direkt angeben, wobei die Messunsicherheit nicht größer als der milliardste Teil des Abstandes zweier Atome im Festkörper ist. Diese Messtechnik liefert die Erkenntnisse zur atomaren Struktur von Siliziumkristallen, die bei der Bestimmung der Avogadro-Konstanten mit der sogenannten Kristalldichtemethode und damit letztlich zur Bestimmung der Planck-Konstanten erforderlich waren, eine entscheidende Voraussetzung für die Neudefinition des Kilogramms. Damit wird auch das letzte auf einem Artefakt basierende Primärnormal durch eine Definition über eine Naturkonstante ersetzt. Die Abteilung Optik hat hierzu mit ihrer Messtechnik u. a. zur genauen Bestimmung des Abstands der Atome in einer Kugel aus isotonenangereichertem hochreinem Silizium-28 wesentlich beigetragen.

Abteilung Optik

In der Abteilung Optik werden drei der sieben Basis-einheiten des Internationalen Einheitensystems (SI) dargestellt, bewahrt und weitergegeben: die Candela (cd, Lichtstärkeeinheit), die Sekunde (s, Zeiteinheit) und das Meter (m, Längeneinheit). Die Abteilung realisiert mit der Zeitskala UTC(PTB) die Grundlage der gesetzlichen Zeit in Deutschland. Außerdem werden im Bereich der optischen Metrologie die Normale höchstgenau gemessen und zuverlässig und kostengünstig für Kunden bereitgestellt. Im Rahmen von nationalen und internationalen Projekten kooperiert die Abteilung mit anderen metrologischen Instituten, Universitäten und Forschungseinrichtungen und arbeitet bei der Zertifizierung und der internationalen Normung mit.

Abteilung 4 Optik

Hon.-Prof. Dr. Stefan Kück
Telefon: (0531) 592-4010
E-Mail: stefan.kueck@ptb.de

Fachbereich 4.1

Photometrie und Spektroradiometrie
Dr. Armin Sperling
Telefon: (0531) 592-4100
E-Mail: armin.sperling@ptb.de

Fachbereich 4.2

Bild- und Wellenoptik
Dr. Egbert Buhr
Telefon: (0531) 592-4200
E-Mail: egbert.buhr@ptb.de

Fachbereich 4.3

Quantenoptik und Längeneinheit
Dr. Harald Schnatz
Telefon: (0531) 592-4300
E-Mail: harald.schnatz@ptb.de

Fachbereich 4.4

Zeit und Frequenz
Dr. Ekkehard Peik
Telefon: (0531) 592-4400
E-Mail: ekkehard.peik@ptb.de

Fachbereich 4.5

Angewandte Radiometrie
Dr. Stefan Winter
Telefon: (0531) 592-4500
E-Mail: stefan.winter@ptb.de

Nachwuchsgruppe 4.01

Metrologie für funktionale Nanosysteme
Prof. Dr. Stefanie Kroker
Telefon: (0531) 592-4530
E-Mail: stefanie.kroker@ptb.de



Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Bundesallee 100
38116 Braunschweig

Abteilung 4 | Optik

Sekretariat

Ingrid Herrmann

Telefon: (0531) 592-4011

Telefax: (0531) 592-4015

E-Mail: ingrid.herrmann@ptb.de

<https://www.ptb.de/cms/ptb/fachabteilungen/abt4.html>

Stand: 7/2018



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

Die Physikalisch-Technische Bundesanstalt, das nationale Metrologieinstitut, ist eine wissenschaftlich-technische Bundesoberbehörde im Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie.

Foto Deckblatt: Ellipsometrie an strukturierten Oberflächen (Gitterstrukturen). Die Gitterperioden liegen zwischen 320 nm und 520 nm, sodass Beugungsfarben sichtbar sind. (PTB)