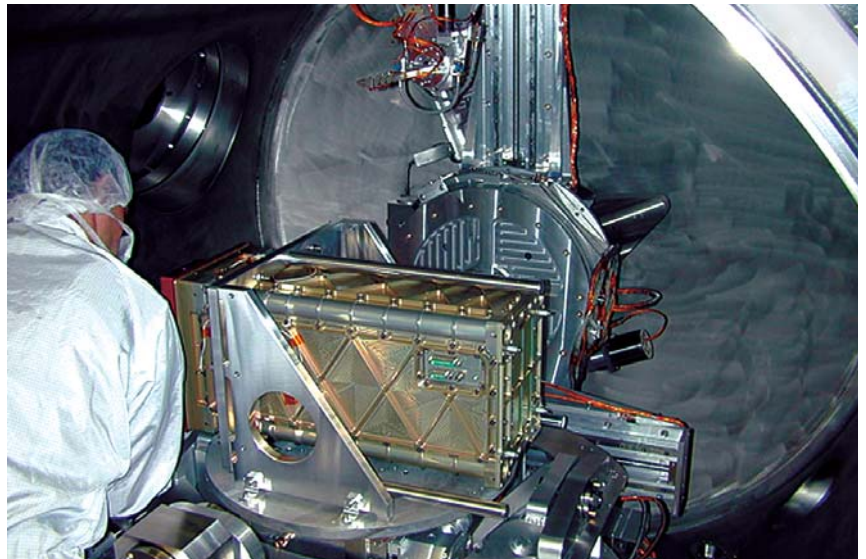


## ISS-Instrument bei BESSY charakterisiert

Auf der Internationalen Raumstation ISS sollen Ende dieses Jahres quantitative Messungen der Sonnenstrahlung mit bisher nicht erreichter Genauigkeit vor allem auch im Wellenlängenbereich von 17 nm bis 220 nm beginnen. Das dafür entwickelte Messinstrument hat die PTB in ihrem Radiometrielaboratorium am Berliner Elektronenspeicherring BESSY II charakterisiert.

Das Sonnenbeobachtungsinstrument SolACES (Solar Auto-Calibrating EUV/UV Spectrophotometers) für den kurzwelligen Spektralbereich ist Bestandteil des wissenschaftlichen Instrumentenpakets SOLAR für die ISS. SolACES wurde unter Federführung des Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik (IPM) in Freiburg entwickelt und besteht aus zwei Doppel-Spektrophotometern für den spektral aufgelösten Nachweis der einfallenden EUV/UV-Strahlung sowie zwei Ionisationskammern, mit deren Hilfe während des Fluges regelmäßig Auto-Kalibrationen durchgeführt werden sollen, um die unvermeidbaren Empfindlichkeitsänderungen der Spektrophotometer zuverlässig zu erfassen. Damit soll als vorrangiges wissenschaftliches Ziel von SolACES die Messung des spektralen EUV/UV-Strahlungsflusses der Sonne, der die Hauptenergiequelle für die obere Erdatmosphäre darstellt, mit zuvor nicht erreichter geringer Unsicherheit von unter 10 % gelingen. Bisher liegen die Unsicherheiten bei bestenfalls 20 % bis über 400 %. Die genaueren Messergebnisse sollen es insbesondere auch ermöglichen, den Einfluss des sogenannten Weltraumwetters auf die Bahnen von Satelliten



Einbau von SolACES in die Vakuumkammer des EUV-Reflektometersystems der PTB bei BESSY II

und Weltraummüll sowie auf die satellitengestützte Telekommunikation und Navigation besser vorherzusagen.

Mit den Messungen im PTB-Labor bei BESSY II, die im Rahmen einer Forschungskooperation mit dem IPM an zwei verschiedenen Strahlführungen stattfanden, wurde die radiometrische Grundlage für die angestrebten Messunsicherheiten geschaffen. Dazu wurden Korrekturfaktoren für die beiden Ionisationskammern, die Transmission der insgesamt 43 verschiedenen Dünnschicht-Metall- und Kristallfilter sowie die Spektrophotometer-Empfindlichkeiten bestimmt.

Weitergehende Informationen von M. Richter,  
Tel.: (030) 63 92-50 84,  
E-Mail:  
mathias.richter@ptb.de

## Extrem schnelle SQUID-Elektronik

In der PTB werden hochempfindliche SQUIDs für die verschiedensten messtechnischen Anwendungen entwickelt. Die jüngste Entwicklung, eine gekühlte SQUID-Elektronik, erlaubt jetzt den Aufbau extrem schneller SQUID-Messsysteme.

SQUIDs (Superconducting QUantum Interference Devices) werden üblicherweise zur empfindlichen Messung kleiner magnetischer Felder verwendet, lassen sich aber auch sehr gut für die Messung kleinster Ströme einsetzen. So werden sie z. B. in medizinischen Diagnostiksystemen zur Detektion der magnetischen Signale des Herzens oder des Gehirns verwendet oder als Vorverstärker für bestimmte Typen von Strahlungsdetektoren wie Mikrokalorimeter eingesetzt, die wie die SQUIDs selbst bei tiefen Temperaturen betrieben werden. Neben dem SQUID-Chip, der supraleitenden integrierten Sensorschaltung, die in der Regel mit

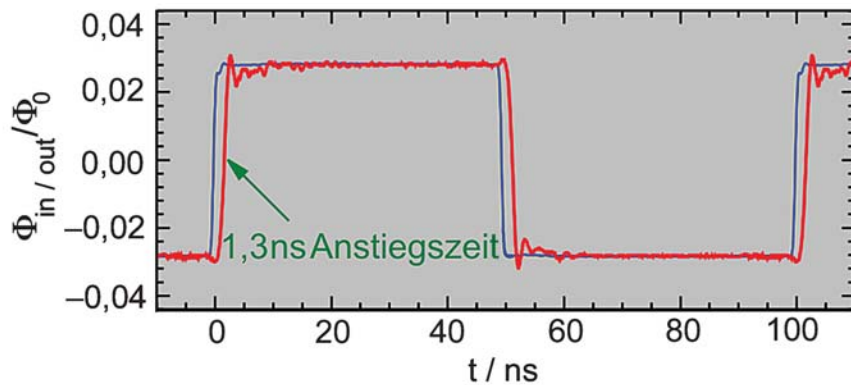
flüssigem Helium gekühlt wird, benötigt man eine Ausleseelektronik, die das SQUID-Ausgangssignal rauscharm verstärkt und als magnetischen Fluss wieder in das SQUID „gegenkoppelt“, so dass die periodische Fluss-Spannungskennlinie des SQUIDs linearisiert wird. Damit wird der Dynamikbereich des SQUIDs, der sonst nur Bruchteile eines magnetischen Flussquants beträgt, auf die für typische Anwendungen benötigten 10 bis 100 Flussquanten erweitert. Die so aufgebaute Flussregelschleife (englisch flux-locked loop, FLL) bestimmt die Bandbreite des Sensorsystems. Mit moderner kommerzieller FLL-Elektronik konnten bisher Bandbreiten bis 20 MHz in geschlossener Regelschleife erreicht werden. Die Bandbreitenbegrenzung resultiert dabei aus der Signallaufzeit auf den Verbindungsleitungen zwischen dem SQUID-Chip, das sich

Weitergehende Informationen von D. Drung,  
Tel.: (030) 34 81-73 42,  
E-Mail:  
dietmar.drung@ptb.de

Fortsetzung auf Seite 2

**Extrem schnelle SQUID-Elektronik** (Fortsetzung von Seite 1) im Heliumbad eines Kryostaten befindet, und der Elektronikeinheit, die üblicherweise entfernt auf dem Kryostatendeckel montiert ist. Deutlich reduzierte Leitungslängen und damit höhere Bandbreiten kann man erzielen, wenn auch die FLL-Elektronik in unmittelbarer Nähe des SQUID-Chips im flüssigen Helium betrieben wird. Das bedeutet aber, dass die Elektronik für eine Temperatur von 4,2 K ausgelegt werden muss, was erheblichen Aufwand bei der Schaltungsentwicklung mit sich bringt.

In der PTB wurde jetzt eine mit Flüssighelium gekühlte FLL-Schaltung entwickelt, die beim Betrieb mit einem PTB-SQUID-Sensorchip eine Systembandbreite von 350 MHz erreichte und neue Perspektiven für spezielle Anwendungen eröffnet, z. B. bei der Signalverstärkung von supraleitenden Hot-Spot-Photonenzählern. Auch die neue Elektronik soll Anwendern kommerziell zugänglich gemacht werden.

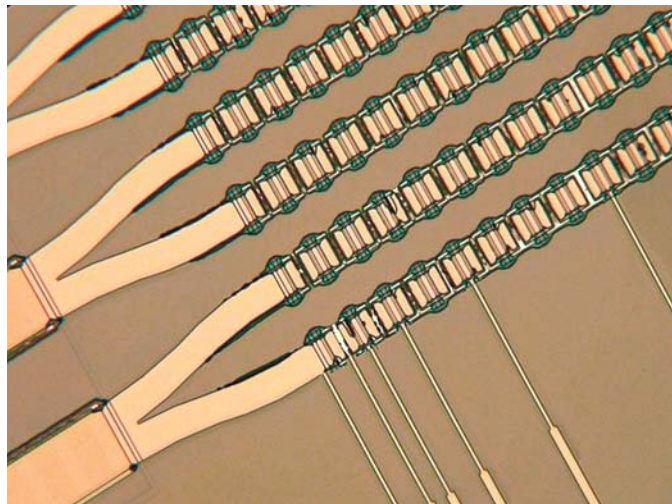


Gemittelte Kleinsignal-Sprungantwort der bei 4,2 K betriebenen SQUID-Elektronik. Die blaue Kurve zeigt den angelegten magnetischen Fluss, der sich praktisch sprunghaft ändert; die rote Kurve stellt das Ausgangssignal des Systems dar. Mit der hohen Kleinsignal-Bandbreite von 350 MHz wird die kurze Anstiegszeit des Ausgangssignals von nur 1,3 ns erreicht.

## Quantenvoltmeter für Wechselspannungen

Das in der PTB konzipierte Quantenvoltmeter für Wechselspannungen erreichte bereits in der Testphase eine Unsicherheit von  $5 \cdot 10^{-8}$  bei der Messung eines 400-Hz-Signals, einen zehn mal geringeren Wert als zuvor. Die bisher bei Gleichspannungskalibrierungen genutzte überragende Leistungsfähigkeit supraleitender Quantennormale ist damit auch für die direkte Messung von Wechselspannungen verfügbar.

Zur Messung von Wechselspannungen im Niederfrequenzbereich nutzt man Abtastverfahren, bei denen die veränderliche Spannung wiederholt in schneller Folge gemessen („abgetastet“) wird. Der Verstärkungsfaktor und die interne Spannungsreferenz des Abtastvoltmeters begrenzen dabei jedoch die erreichbare Unsicherheit. Dies kann man praktisch vollständig vermeiden, wenn die abgetastete Spannung direkt mit der Spannung eines Josephson-Quantennormals verglichen wird, die bei einem Volt besser als 0,1 nV bekannt ist.



Teil einer Josephson-Reihen-Schaltung. Von links kommen die Mikrowellenleiter, von unten die Steuerleitungen für die einzelnen Segmente.

In einem in der PTB entwickelten und patentierten Verfahren wird diese Idee umgesetzt. Dazu synthetisiert man zunächst Wechselspannungen mit programmierbaren Josephson-Reihen-Schaltungen. Ein auf die Temperatur flüssigen Heliums abgekühlter Chip enthält 8192 mit einer Mikrowellenfrequenz von 70 GHz versorgte supraleitende Tunnelelemente, sogenannte Josephson-Kontakte. Sie sind auf Segmente mit 1, 2, 4, 8, 16 ... Kontakten verteilt. Schaltbare Stromquellen steuern einzelne Segmente so an, dass sie quantisierte Teilspannungen erzeugen, die sich zur Gesamtspannung addieren. Da ein Schaltvorgang weniger als 100 ns benötigt, kann mit dieser schnell einstellbaren quantisierten Vergleichsspannung die sich langsamer ändernde Mess-Spannung jederzeit kompensiert werden. Durch präzise Synchronisierung des Synthesevorgangs mit der zu messenden Wechselspannung und einem Abtastvoltmeter bleibt die resultierende Differenzspannung immer sehr klein und kann mit hoher Empfindlichkeit bestimmt werden.

Mit neuen und bisher nur in der PTB hergestellten programmierbaren Josephson-Schaltungen können mittlerweile sogar Wechselspannungen mit Amplituden von 10 Volt synthetisiert werden, was eine Reihe zusätzlicher Anwendungen ermöglicht. Insbesondere aber sollte sich durch das größere Signal-Rausch-Verhältnis die erreichbare relative Messunsicherheit um eine weitere Größenordnung verringern.

Weitergehende Informationen von R. Behr,  
Tel.: (05 31) 592-22 42,  
E-Mail: ralf.behr@ptb.de

# Roboter-Goniophotometer zur Messung des Lichtstroms

Ein weltweit einzigartiges Goniophotometer mit drei langarmigen Robotern wurde jetzt in Betrieb genommen. Mit seinen neu entwickelten Photometerköpfen kann es simultan und spektral integrierend photometrische, radiometrische und colorimetrische Größen sowie gleichzeitig mit einem CCD-Array-Spektrometer relative spektrale Verteilungen erfassen.

Aufgabe der PTB ist es, die Einheit „Lumen“ des Lichtstroms, die fundamental aus der SI-Basiseinheit „Candela“ für die Lichtstärke abgeleitet ist, an die Industrie weiterzugeben. Bisher wurde in der PTB für Kalibrierung der hierfür eingesetzten Transfornormale ein in den siebziger Jahren entwickeltes Goniophotometer in Kardanausführung eingesetzt. Messtechnische Einschränkungen und eine veraltete Rechnertechnik waren der Grund für eine Neukonstruktion, von der man sich auch eine Verringerung der Messunsicherheiten versprach.

Das völlig neu gestaltete Goniophotometer, dessen Konzept durch ein internationales Patent geschützt ist, wurde in der PTB entwickelt und jetzt in Betrieb genommen. Es besteht aus drei Robotern mit je 7 gesteuerten Achsen zur Bewegung der schlanken Arme von mehr als 6,40 m Länge. Ein Roboter trägt die Lichtquelle in frei wählbarer Brennlage, richtet sie im Gerätezentrum aus und hält sie während der Messung in Position. Die beiden anderen Roboter richten je einen Photometerkopf auf die Lichtquelle aus und teilen den Raum in Hemisphären. Sie können beliebige Bahnen mit Abständen von 1 m bis 3 m bei Messdauern von typisch 10 min bis 1 h ausführen. Die Orientierung der Roboter im Raum sowie ihre kinematische Charakterisierung wird mit einem Lasertracker-System bestimmt. Damit ergeben sich Bahnabweichungen des Photometerkopfes von < 0,6 mm bzw. im Mittel von nur 0,2 mm. Die bewegbaren Photometerköpfe und ein Monitor-Photometerkopf sind jeweils als

Dreibereichsfarbmesskopf mit 4 Kanälen ausgeführt. Sie beinhalten zusätzlich eine ungefilterte Si-Photodiode für radiometrische Messungen und ein CCD-Array-Spektrometer. So werden Licht, Farbe und optische Strahlung durch dasselbe Lichteintrittsfenster gemessen, alle Photoströme parallel erfasst und in Frequenzen gewandelt. Das erlaubt die simultane Messung aller 18 Kanäle bei synchroner Triggerung und beliebigen Integrationszeiten, optimal angepasst an Bewegungsabläufe der Roboter und Modulierungen des Lichtes.

Mit dem neuen Roboter-Goniophotometer können nun bei erheblich reduzierter Messzeit neben den photometrischen auch Farbkennzahlen von Lichtquellen ermittelt werden. Durch den Einsatz der frei programmierbaren Roboter sind nahezu beliebige Messkopf-Bahnkurven und Nah- und Fernfeldmessungen möglich. Die ozonfeste Ausführung des Goniometers lässt zudem auch die Messung von UV-Lampen zu, und durch den einstellbaren Temperaturbereich von 25 °C bis 35 °C können auch Leuchtstofflampen bei der jeweiligen Leuchtentemperatur gemessen werden.

Weitergehende Informationen von M. Lindemann,  
Tel.: (05 31) 592-41 25,  
E-Mail:  
matthias.lindemann@ptb.de



Blick in das Roboter-Goniophotometer mit einem LED-Array als Lichtquelle im Gerätezentrum und den beiden Messrobotern in Grundstellung. Die Personengruppe gibt einen Größenvergleich.

## Joint Optical Metrology Center

Die TU Braunschweig und die PTB haben das Joint Optical Metrology Center (JOMC) gegründet. Wissenschaftler der Elektrotechnik der TU und der Abteilung Optik der PTB werden künftig unter diesem Dach gemeinsam an der Erforschung und Entwicklung optischer Messtechnik arbeiten.

Innerhalb des JOMC sollen ausgewählte Projekte bearbeitet werden: von einer neuartigen Idee über die Evaluierung des passenden metrologischen Konzeptes bis zur Realisierung eines Prototyps. Die Vision des JOMC ist es, die Grenzen optischer Messtechnik zu erweitern und neue metrologische

Applikationen vorzugsweise im Sichtbaren und Nah-Infraroten zu begründen. Bisher messtechnisch nicht genutzte Frequenzbereiche werden erschlossen. Die Forschung im JOMC soll zu innovativen Technologien und Abläufen führen sowie zu Prototypen mit neuartigen Eigenschaften bei reduzierten Produktionskosten und standardisiertem, validiertem Verhalten. Als erste Schwerpunkte werden die Arbeitsgebiete Quantitative Detektierung und Identifikation von Nanopartikeln, die Fluoreszenz kennzeichnung und -identifikation in Bio- und Medizintechnologie, Gassensoren, Quantitative Detektion elektromagnetischer Felder und Quanten-Kommunikation bearbeitet.

Weitergehende Informationen von F. Riehle,  
Tel.: (05 31) 592-40 10,  
E-Mail:  
fritz.riehle@ptb.de

# Neuartiges DUV-Scatterometer einsatzbereit

Ein neuartiges Scatterometer zur dimensionellen Charakterisierung von nanostrukturierten Oberflächen ist in der PTB entwickelt und aufgebaut worden. Es wird insbesondere im tiefen ultravioletten Wellenlängenbereich (DUV) eingesetzt.

Mit einem Scatterometer wird die an einer Probe gebeugte bzw. gestreute Strahlung analysiert, ohne abbildende Optiken (Objektive) einzusetzen. Die Messungen sind prinzipiell nicht durch die Auflösungsgrenze abbildender Verfahren begrenzt, die in der optischen Mikroskopie in der Größenordnung einer halben Wellenlänge liegt. Die Scatterometrie eignet sich daher insbesondere zur quantitativen Bestimmung von Querschnittsprofilen (periodisch) nanostrukturierter Oberflächen.

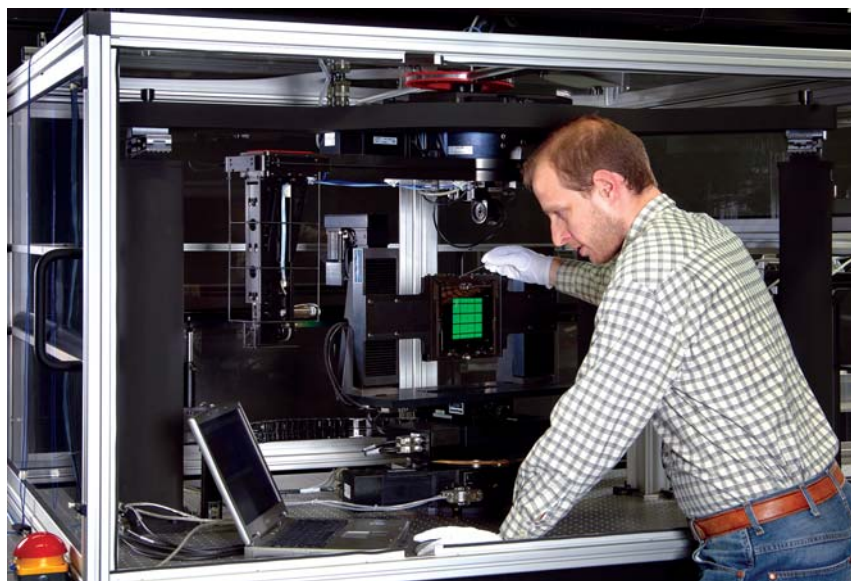
Das neue Scatterometer wurde so konzipiert, dass möglichst viele Eigenschaften der gestreuten Strahlung erfasst werden. Es ermöglicht die hochgenaue Messung sowohl der Strahlungsleistung und des Polarisationszustandes als auch der Ausbreitungsrichtung (Beugungswinkel). Alle vom Einfallswinkel abhängigen scatterometrischen Größen der Reflektometrie, Ellipsometrie und Diffraktometrie können mit dem neuen Instrument gemessen werden. Die komplexe Auswertung erlaubt die quantitative Charakterisierung der nanostrukturierten Oberflächen auch weit unterhalb der Auflösungsgrenze optisch-abbildender Verfahren.

Als Strahlungsquelle wird ein Titan-Saphir-Laser-System mit Frequenzvervielfachung eingesetzt. Neben der zwischen 772 nm und 840 nm durchstimmbaren Fundamentalwellenlänge kann auch auf die 2., 3. und 4. Harmonische zugegriffen werden. Im DUV steht somit ein durchstimmbarer nutzbarer Wellenlängenbereich von 193 nm bis 210 nm zur Verfügung.

Bei der wichtigen Lithographiewellenlänge von 193 nm kann die PTB damit zusätzlich so genannte „at-wavelength-Metrologie“ anbieten. Diese umfasst u. a. Polarisations-/Depolarisations- und Transmissionsmessungen (Müller-Matrix-Messungen) an strukturierten wie unstrukturierten Proben. Durch die sehr gute Übereinstimmung von ersten Polarisationsmessungen mit Simulationsrechnungen konnten die Designparameter einer Nanostruktur bestätigt werden.

Mit diesem hochautomatisierten System verfügt die PTB nun über ein weltweit einzigartiges Messgerät für die Metrologie an Photolithographiemasken aktueller und kommender Technologiegenerationen.

Weitergehende Informationen von M. Wurm,  
Tel.: (05 31) 592-42 50,  
E-Mail:  
matthias.wurm@ptb.de



Einbau und Ausrichtung einer (im gebeugten Licht grün erscheinenden) Lithographie-Photomaske im neuen DUV-Scatterometer.

## Vereinte europäische Metrologie

PTBnews 07.1  
Deutsche Ausgabe  
April 2007  
ISSN 1611-1621

Herausgegeben von der  
Physikalisch-Technischen  
Bundesanstalt (PTB)  
Braunschweig und Berlin

Chefredakteur Jens Simon  
PTB, Bundesallee 100  
38116 Braunschweig  
Telefon: (05 31) 592-30 06  
Fax: (05 31) 592-30 08  
E-Mail: ptbnews@ptb.de  
Webseite: <http://www.ptb.de/>

Die metrologischen Staatsinstitute Europas rücken innerhalb der Forschung enger zusammen: Am 11. Januar 2007 unterzeichneten die ersten 26 Institute bei einem feierlichen Akt in Berlin den Gründungsvertrag des Vereins „EURAMET e.V.“. Ein wesentliches Ziel des Vereins ist es, ein gemeinsames europäisches Metrologieforschungsprogramm auf die Beine zu stellen. Über eine substantielle Forschungsförderung wird derzeit intensiv mit der Europäischen Kommission verhandelt.

Der Verein EURAMET e.V., der seinen Sitz in Braunschweig hat und dessen Geschäftsstelle in der PTB beheimatet ist, löst die bisherige Organisation der metrologischen Staatsinstitute (EUROMET) ab und tritt nun als juristische Person mit deutlich erweiterten Aufgaben und Zielen auf. Denn diese Organisation soll ein bisher nicht dagewesenes

europäisches Forschungsprogramm der Metrologie aufstellen und koordinieren. Ein Programm, das dann von den nationalen Metrologieinstituten durchgeführt wird. Die einzelnen Kompetenzen und Ressourcen der Institute können so zusammengeführt werden.

Die metrologischen Staatsinstitute verhandeln zur Zeit mit der Europäischen Kommission über eine Forschungsförderung im Rahmen des Artikels 169 des Vertrages zur Gründung der Europäischen Gemeinschaft. Dabei ist EURAMET einer von vier namentlich genannten Kandidaten, deren Vorhaben in der engeren Wahl der Kommission stehen. Eine Entscheidung wird für 2008 erwartet.

Weitergehende Informationen von M. Kühne,  
Tel.: (05 31) 592-30 01,  
E-Mail:  
michael.kuehne@ptb.de