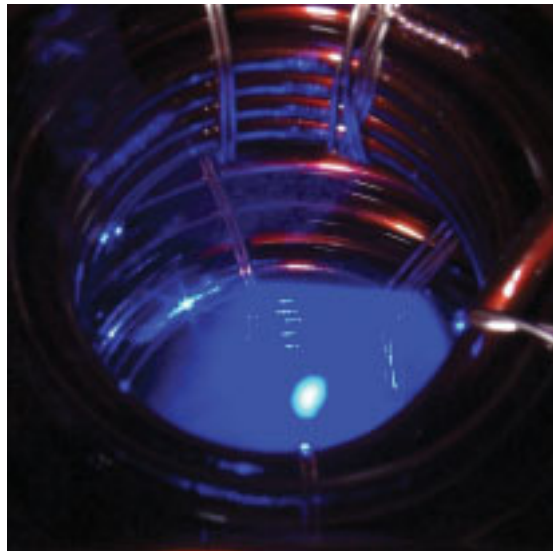


## Auf dem Weg zur optischen Atomuhr

„Optische Uhren“ gelten als Kandidaten für einen genaueren und stabileren Zeitstandard. Im Vergleich zu den derzeit besten Caesium-Mikrowellen-Atomuhren genügen deutlich kürzere Mittelungszeiten, um Unsicherheiten von  $10^{-15}$  zu erreichen. Mit Calcium-Atomen, die auf  $10\ \mu\text{K}$  gekühlt werden, und einem Femtosekunden-Kammgenerator gelang in der PTB ein großer Schritt in Richtung auf eine optische Atomuhr.

Die Kühlung geschieht in zwei Schritten: Zunächst werden (im Ultrahochvakuum) die Calcium-Atome durch Streuung von resonantem Laserlicht abgebremst und in einer magnetooptischen Falle gespeichert. Dann wird der Frequenzübergang bei einer Wellenlänge von  $657\ \text{nm}$  (der „Uhrenübergang“) selbst zur Kühlung verwendet, um die Wolke von etwa  $10^7$  ultrakalten Atomen bei  $10\ \mu\text{K}$  zu präparieren. Zur Abfrage der schmalen Linie (natürliche Linienbreite  $0,3\ \text{kHz}$ ) werden alle Laser- und Magnetfelder abgeschaltet und die frei fallenden Atome mehrmals mit dem Licht eines sehr schmalbandigen Lasers mit einer Linienbreite von etwa einem Hz angeblitzt. Nachdem man festgestellt hat, welcher Bruchteil der Atome angeregt ist, wird die Laserfrequenz so nachgestellt, dass sie exakt mit der Resonanzfrequenz der Atome übereinstimmt. Mit der neuen Technik der optischen Kammgeneratoren lässt sich die Frequenz dieser Resonanz dabei problemlos bestimmen und zugleich auf die Mikrowellenfrequenz des Primärnormals für Zeit und Frequenz, die Caesium-Atomuhr, zurückführen.

Bei diesen Experimenten mit sehr kalten Atomen ist die Messunsicherheit im Wesentlichen nur noch durch zufällige quantenmechanische Fluktuationen bestimmt. Da die Atome in der Wolke simultan abgefragt werden, können Abweichungen des Lasers von der atomaren Übergangsfrequenz sehr rauscharm detektiert werden. Ein besonderer Vorteil dieser optischen Uhr ist daher, dass zum Erreichen einer relativen Unsicherheit von  $10^{-15}$  nicht mehrere Stunden (wie bei Cs-Atomuhren), sondern nur noch weniger als eine Sekunde gemittelt werden müsste; prinzipiell ließe sich die Mittelungszeit sogar auf eine Zehntelsekunde reduzieren.



Fluoreszenz einer Wolke von Calcium-Atomen während der ersten Phase der Laserkühlung

Weitergehende Informationen von U. Sterr,  
Tel.: (05 31) 592-43 12,  
E-Mail: uwe.sterr@ptb.de

## Resonator-Solitonen als Informationsträger

Optische Kommunikationssysteme sind auf dem Vormarsch. Dafür wird es angestrebt, binäre Informationen rein optisch und auch parallel zu verarbeiten. Ansätze hierzu mittels nichtlinearer Halbleiteroptik scheiterten bisher am Problem der Ladungsträgerdiffusion. Diese stellt aber kein Problem dar, wenn man als Informationsträger „räumliche Solitonen“ verwenden kann.

In der Optik sind Solitonen vor allem als Pulse auf Glasfasern bekannt, die bei der Ausbreitung nicht auseinanderlaufen, weil nichtlineare optische Eigenschaften des Materials die Dispersion kompensieren. Es gibt ein räumliches Analogon dazu, bei dem die Beugung durch Nichtlinearitäten balanciert wird. Diese räumlichen Solitonen haben in

einem Resonator die Eigenschaft der Bistabilität und der transversalen Beweglichkeit, was sie als optische Informationsträger geeignet macht, aber beispielsweise auch als trägheitslose Abtastsonden in der Mikroskopie. Während solche Solitonen zunächst nur in langsamen nichtlinear-optischen Materialien nachgewiesen werden konnten, gelang es in der PTB, räumliche Solitonen in Halbleiter-Mikroresonatoren zu erzeugen. Damit sind schnelle Schaltgeschwindigkeiten und die vorteilhafte Integration mit anderen Halbleiterbauelementen möglich. Eine Anwendung, welche speziell die Beweglichkeit der Solitonen nutzt, ist ein „Photonen-Puffer“. Er wird allgemein bei solchen Problemen gebraucht, die eine Zwischenspeicherung optischer

Fortsetzung auf Seite 2

### Resonator-Solitonen als Informationsträger

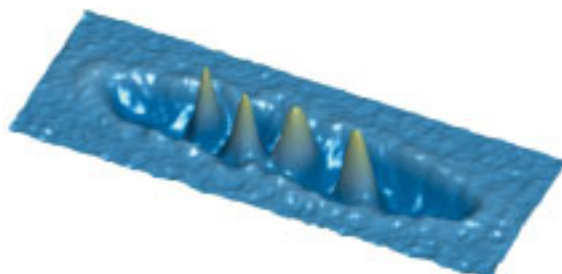
(Fortsetzung von Seite 1)

Informationen erfordern, speziell aber bei der Synchronisierung optischer Kommunikationsnetze und im optischen „Paket“-Verkehr.

Die Abbildung zeigt den ersten Schritt zur Realisierung eines solchen „Photonen-Puffers“. Ein quasi eindimensionaler Bereich eines Halbleiterresonators ist beleuchtet. Am linken Ende werden nacheinander Solitonen „geschrieben“, die mit einstellbarer Geschwindigkeit nach rechts driften. Am rechten Ende werden sie ausgelesen. Die Driftzeit der Solitonen bestimmt die Zeit der Zwischenspeicherung der optischen Information. Sie kann durch Parameter des Lichtfeldes oder auch durch ein elektrisches Feld kontinuierlich variiert werden.

In passiven Resonatoren ist die zur Aufrechterhaltung eines Solitons benötigte Leistung mit ca. 1 mW noch recht hoch. Durch Nutzung eines aktiven Resonators (VCSEL Laser-Struktur) konnte die Leistung aber bereits auf 80  $\mu$ W verringert werden und 10  $\mu$ W erscheinen als realisierbar. Damit kön-

nen auch zweidimensionale Anwendungen wie beispielsweise Schaltmatrizen ins Auge gefasst werden. Die gemeinsam mit weiteren Forschungsgruppen aus Deutschland, Frankreich und Grossbritannien durchgeführten Arbeiten wurden im ESPRIT-Programm der Europäischen Union gefördert.



Vier Solitonen driften in einem durch Licht definierten „Kanal“. Die Solitonen haben einen Durchmesser von ca. 5  $\mu$ m.

Weitergehende Informationen von C. O. Weiss,  
Tel.: (05 31) 592-44 00  
E-Mail:  
carl.weiss@ptb.de

## Computer-Tomographen in der Industrie: Genauigkeit gesteigert

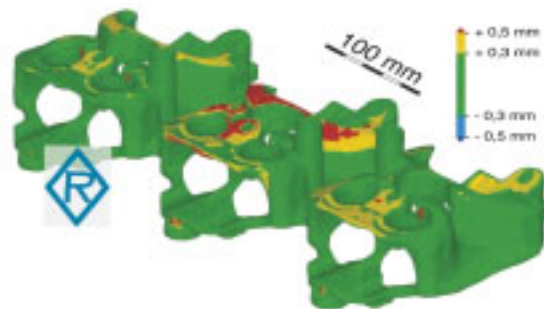
**Für zerstörungsfreie Messungen von Bauteil-Geometrien werden zunehmend industrielle Computertomographie-Anlagen eingesetzt. Die dabei auftretenden Messabweichungen konnten in einem Industrieprojekt deutlich verringert werden.**

Das Verfahren der Computertomographie (CT) mit Röntgenstrahlen stammt aus der Medizin, wird aber schon seit längerer Zeit zur zerstörungsfreien Fehlererkennung eingesetzt. Neuerdings werden industrielle CT-Anlagen auch für dimensionelle Messungen mit hoher Punktdichte wie z. B. Wanddickenbestimmung oder Soll-Ist-Vergleiche gegen CAD-Daten eingesetzt. CT kann hier insbesondere innere Geometrien bestimmen, die klassisch nur nach Zerteilen des Objekts zugänglich sind. Komplexe Einflussgrößen verursachen bei der CT allerdings Messabweichungen, die bislang schlecht quantifiziert werden konnten.

In Zusammenarbeit mit einem mittelständischen Gießereiunternehmen wurden deshalb die dimensionellen Messeigenschaften von CT erfasst. Mit der 450 kV-CT-Anlage des Industriepartners wurden Prüfkörper aus Aluminium, Keramik, Granit und Aluminiumussteile (z. B. Zylinderköpfe mit max. durchstrahlter Dicke von 200 mm) untersucht, die vorher taktil mit Koordinatenmessgeräten kalibriert worden waren. Mit den daraus entwickelten Verfahren werden bisher nicht erfasste systematische Abweichungen korrigiert. So konnten bereits für Einzelpunkte die Messabwei-

chungen auf bis zu 0,1 mm reduziert werden. Für bestimmte Anwendungen ist die CT damit schon heute in der Lage, Messungen auf Koordinatenmessgeräten zu ersetzen. Die verstärkte Nutzung von CT ist hier abzusehen.

In einem neuen BMWA-Projekt verfolgt die PTB in Kooperation mit zehn deutschen Industrieunternehmen sowie der Bundesanstalt für Materialprüfung und -forschung (BAM) das Ziel, die Genauigkeit von CT-Anlagen weiter zu steigern. Untersucht werden einerseits Anlagen mit Standardröntgenröhren zur Messung großer, massiver Bauteile. Andererseits werden CT-Anlagen mit Mikrofokusröntgenröhren bis 225 kV mit kleinsten erfassten Volumenelementen (Voxeln) von derzeit 3  $\mu$ m Kantenlänge betrachtet, mit denen für kleine Bauteile Messunsicherheiten im  $\mu$ m-Bereich erreicht werden sollen.



Durch CT-Messung bestimmte Kontur eines Zylinderkopfwasserraums. Die farbkodierte Oberfläche stellt die Abweichungen zur Sollkontur dar (Quelle: Fa. Rautenbach, Wernigerode).

Weitergehende Informationen von M. Bartscher,  
Tel.: (05 31) 592-53 21,  
E-Mail:  
markus.bartscher@ptb.de

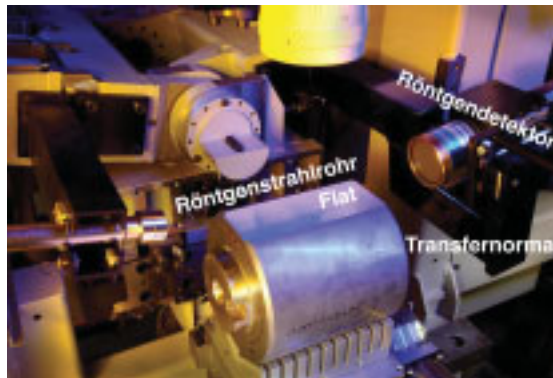
# Orientierung von Silicium-Wafern wird kalibrierbar

Ein in der PTB entwickeltes Verfahren eröffnet die Möglichkeit, die Kristallorientierung von Silicium-Einkristallen an die Industrie weiterzugeben. Damit wird die Ausrichtung der Wafer bei der Chip-Produktion einfacher und kostengünstiger.

Für die Herstellung elektronischer Bauelemente ist es unerlässlich, die genaue Lage der Netzebenen auf einem Silicium-Wafer zu kennen. Daher benötigen die Chiphersteller zertifizierte Wafer mit dieser Angabe. Die Produzenten versehen die Wafer zu diesem Zweck mit so genannten Flats oder auch V-Nuten, deren Winkellagen zur Netzebene mit einer Messunsicherheit unterhalb von Winkelminuten angegeben werden sollen.

Die PTB hat aufgrund ihrer Forschungsarbeiten mit Silicium-Einkristallen ein Verfahren und ein TransfERNormal entwickelt, um diese so genannten Off-Winkel zu kalibrieren. Das TransfERNormal ist ein rund 20 cm langer, rundgeschliffener Silicium-Einkristall, an dessen Mantelseite ein Spiegel (Flat) parallel zur (100)-Netzebene aufpoliert wurde. An der gegenüberliegenden Seite wurde eine V-Nut eingefräst. Sie soll in Zukunft dazu dienen, die Wafer für den Prozess der Chip-Produktion zu orientieren. Die kostenintensive Flat-Methode bei jedem einzelnen Wafer wäre damit nicht mehr nötig.

Die Messung der Nut relativ zur Netzebene geschieht in zwei Schritten. Zunächst wird mit einer Koordinatenmessmaschine die Lage der Nut zur Spiegelfläche bestimmt, danach wird mit der Kristall-Orientierungsapparatur der PTB (s. PTBnews 01.3) mittels Röntgenstrahlbeugung die Winkellage des Spiegels zur Netzebene gemessen. Die erreichte Messunsicherheit liegt im Bereich weniger Winkelsekunden und erfüllt die an das TransfERNormal gestellten technischen Anforderungen.



Das neue TransfERNormal mit aufpoliertem Spiegel (Flat) in der Kristall-Orientierungs-Apparatur der PTB

Weitergehende Informationen von U. Kuetgens,  
Tel.: (05 31) 592-61 32,  
E-Mail:  
ulrich.kuetgens@ptb.de

## Kraftstöße dynamisch kalibrierbar

Eine in der PTB entwickelte und gebaute Kraftstoß-Normal-Messeinrichtung ermöglicht es erstmals, stoßförmig belastete Kraftaufnehmer dynamisch zu kalibrieren. Die Beschleunigung zweier stoßender Massen wird dabei mit Hilfe von Laser-Doppler-Interferometern bestimmt.

Obwohl die dynamische Kraftmessung in vielen Bereichen der Industrie immer wichtiger wird (zum Beispiel bei Crashtests), ist es nach wie vor übliche Praxis, auch dynamisch eingesetzte Kraftaufnehmer nur statisch zu kalibrieren. Folglich sind die wirklichen Messunsicherheiten nicht genau bekannt.

Als Ergänzung zur etablierten statischen Kalibrierung hat die PTB eine Kraftstoß-Normal-Messeinrichtung entwickelt, die die Messgröße Kraft über das Prinzip der Trägheit beschleunigter Massen darstellt. Hierbei wird die Kraft durch Messung von Masse und Beschleunigung auf die SI-Basiseinheiten rückgeführt.

Die Einrichtung verwendet zwei über lineare Luftlager reibungsarm geführte, quaderförmige Massekörper von etwa 10 kg, die mit einem dazwischen montierten Kraftaufnehmer zur Kollision gebracht werden. Die Geschwindigkeit der Massekörper wird mittels Laser-Doppler-Interferometer

(Vibrometer) berührungslos gemessen. Numerisches Differenzieren führt dann auf die gesuchte zeitabhängige Beschleunigung.

Die neue Kalibriereinrichtung für stoßförmige Kräfte bis 20 kN wird derzeit in Betrieb genommen. In ersten Tests konnte eine Reproduzierbarkeit der Kraftamplitude von etwa 0,1 % ermittelt werden. Damit bietet sich erstmals die Möglichkeit, das dynamische Verhalten von Kraftaufnehmern unter gut bekannten Stoßbeanspruchungen zu untersuchen.



Die neue Kraftstoß-Normal-Messeinrichtung. Zwischen den beiden Massekörpern ist der Kraftaufnehmer angebracht.

Weitergehende Informationen von Th. Bruns,  
Tel.: (05 31) 592-11 32,  
E-Mail:  
thomas.bruns@ptb.de



# Zertifizierungsstelle für Messgeräte eingerichtet

Die im Jahr 2004 veröffentlichte Europäische Messgeräte-richtlinie (MID) wird erhebliche Änderungen im gesetzlichen Messwesen bringen. Zur Vorbereitung darauf hat in der PTB eine neue Zertifizierungsstelle ihre Arbeit aufgenommen.

Nach dem derzeitigen deutschen Eichrecht darf ein Hersteller ein eichpflichtiges Messgerät nur dann in den Verkehr bringen, wenn er für das Baumuster eine Zulassung erhalten hat und jedes einzelne Seriengerät geeicht ist. Wenn die MID in den nächsten zwei Jahren durch eine Novelle des Eichrechts in nationales Recht umgesetzt ist, hat der Hersteller die Wahl zwischen verschiedenen Konformitätsbewertungsverfahren. Die bisherige Rolle des Staates als Prüfer und Zertifizierer übernehmen dann Benannte Stellen. Diese werden für die Zertifizierung von Produkten, aber auch für die Anerkennung und Überwachung von Qualitätsmanagementsystemen tätig und für diese Aufgaben von den national zuständigen Ministerien benannt.

Die PTB bereitet sich darauf vor, als Benannte Stelle für die Konformitätsbewertung nach Modul B (Baumusterprüfung), Modul D (Anerkennung der Qualitätssicherung in der Fertigung) und Mo-

dul H1 (Entwurfsprüfung und Anerkennung der Qualitätssicherung in Entwicklung und Fertigung) für alle in der MID enthaltenen Messgerätearten tätig zu werden. Um den mit der Benennung der PTB verbundenen normativen Forderungen – insbesondere nach einer Trennung von Prüfung und Zertifizierung – gerecht zu werden, wurde eine zentrale Zertifizierungsstelle für Messgeräte eingerichtet. Die technischen Prüfungen werden weiterhin dezentral durchgeführt. Die Zertifizierung einschließlich Erteilung der Zulassung erfolgt durch unabhängige Zertifizierungsbeauftragte, die als fachkompetente und erfahrene Mitarbeiter temporär in der Zertifizierungsstelle tätig werden.

Seit Anfang des Jahres werden die Bauartzulassungen nach dem geltenden Eichrecht bereits von der Zertifizierungsstelle genehmigt. Sobald die neuen internen Prozesse routinemäßig verlaufen, werden die genannten Konformitätsbewertungsverfahren eingeführt, so dass die Hersteller frühzeitig die erforderlichen Zertifikate von der PTB erhalten können, um mit dem nationalen Inkrafttreten der MID neue Produkte in den Verkehr bringen zu können.

Weitergehende Informationen von H. Stolz,  
Tel.: (05 31) 592-83 20,  
E-Mail:  
harry.stolz@ptb.de

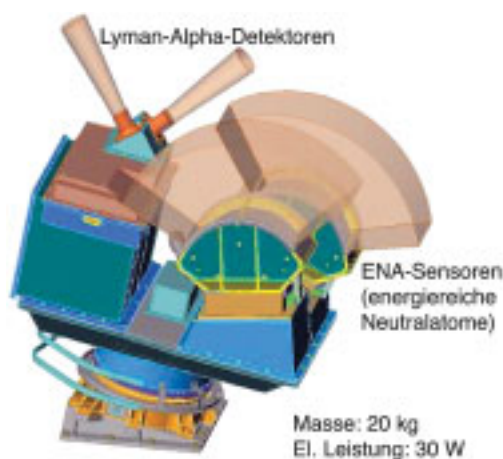
## Photodetektoren für die NASA kalibriert

In Zusammenarbeit mit der Universität Bonn wurden im Radiometrielabor der PTB am Berliner Elektronenspeicherring BESSY II die hochempfindlichen Lyman-Alpha-Photodetektoren der NASA-Mission TWINS (Two Wide-angle Imaging Neutral-atom Spectrometers) kalibriert.

Ziel der TWINS-Mission ist es, die Plasma-Umgebung der Erde dreidimensional abzubilden. Dazu sollen verschiedene Detektionssysteme – als Nutzlast auf zwei SMEX-Satelliten (Small Explorer) – die Magnetosphäre der Erde von zwei Punkten unterschiedlicher Erdumlaufbahnen aus stereoskopisch abbilden. Für die Erstellung eines Wasserstoff-Geokorona-Modells muss dabei auch die Lyman-Alpha-Intensitätsverteilung der terrestrischen Wasserstoff-Exosphäre registriert werden.

Dazu wurden im Institut für Astrophysik und Extraterrestrische Forschung der Universität Bonn zwei im Wellenlängenbereich um 122 nm hochempfindliche Detektionssysteme entwickelt, die im Radiometrielabor der PTB bei BESSY getestet und kalibriert wurden. Für die Messungen mit Strahlungsleistungen im Pikowatt-Bereich musste die PTB-Skala der spektralen Empfindlichkeit im UV

und Vakuum-UV um fünf Größenordnungen zu geringeren Strahlungsleistungen hin erweitert werden, wozu die definierte Einstellbarkeit des Speicherringstromes bei BESSY ausgenutzt wurde. Der Start der beiden Satelliten ist für 2004 bzw. 2005 vorgesehen.



Die TWINS-Instrumentierung besteht aus Detektoren für energiereiche Neutralatome und den von der PTB kalibrierten Lyman-Alpha-Detektoren.

PTBnews 04.1  
Deutsche Ausgabe  
April 2004  
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/>

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