

## Ultrapräzise Ebenheitsmessung

**Ein neues Verfahren ermöglicht die ultrapräzise Messung der Topographie von ebenen und schwach gekrümmten optischen Flächen. Mit der Messapparatur können Formabweichungen von einer ideal ebenen Fläche mit wenigen Atomdurchmessern Messunsicherheit bestimmt werden, ohne auf einen externen Ebenheitsstandard zurückgreifen zu müssen.**

Ebene Flächen von höchster Qualität werden in vielen Bereichen der Industrie und Forschung benötigt. Zum Beispiel werden mit Hilfe von hochgenau gemessenen Planflächen Interferometer kalibriert. Wie weit eine Fläche von der Ebenheit abweicht, wird bisher mit Hilfe eines flüssigen Quecksilberspiegels bestimmt, der zur Zeit als primärer nationaler Ebenheitsstandard dient, aber aufgrund der Kugelgestalt der Erde und der Oberflächenspannung geringfügig von der idealen Ebene abweicht.

Um den gestiegenen Genauigkeitsanforderungen in der Industrie gerecht zu werden, wurde in der PTB eine Messapparatur zur ultraprazisen und rückführbaren Messung der Topographie von planen und schwach gekrümmten optischen Flächen entwickelt. Das Verfahren basiert auf Winkelmessung: Nacheinander werden die Reflexionswinkel an Orten, die auf der Prüflingsoberfläche durch einen konstanten Abstand (Shear) von einigen Millimetern bis Zentimetern getrennt sind, gemessen und die Differenzen ermittelt. Der Reflexionswinkel des Messstrahls wird mit Hilfe eines hochgenauen elektronischen Winkelmessgeräts (Autokolimator) bestimmt. Bei der wiederholten Messung von Schnitten durch Planflächen mit 130 mm Länge weichen die Messpunkte typischerweise nur um 0,1 nm bis 0,2 nm (etwa ein Atomdurchmesser)

voneinander ab. Die Messunsicherheit der neuen Anlage liegt bei etwa einem Nanometer.

Mit dem neuen Verfahren, das ESAD (Extended Shear Angle Difference) genannt wurde, können die Messgrößen, aus denen die Topographie unter Zuhilfenahme der mathematischen Algorithmen gewonnen wird, direkt auf die SI-Einheiten Länge und Winkel rückgeführt werden. Das Verfahren stellt einen prinzipiell neuartigen Ansatz zur Messung von Ebenheitsabweichungen dar. Es ist nicht auf einen externen Ebenheitsstandard angewiesen, sondern nutzt die geradlinige Ausbreitung des Lichts als Referenz. Die ESAD-Anlage besitzt daher das Potential, zukünftig als ultraprazises Primärnormal für Geradheit und Ebenheit mit einer Messunsicherheit im Sub-nm-Bereich zu dienen und den Quecksilberspiegel abzulösen.

*Weitergehende Informationen von R. D. Geckeler, Fax: (05 31) 592-42 18, E-Mail: ralf.geckeler@ptb.de*



*Mit der neuen Apparatur können Prüflinge bis zu einem Durchmesser von 500 mm topographisch ausgemessen werden.*

## Längenmessungen nanometergenau

**Immer geringere Fertigungstoleranzen von Präzisionskomponenten erfordern immer genauere Messgeräte zur Sicherung der Produktqualität. Zusammen mit zwei deutschen Firmen aus den Bereichen Werkzeugmaschinensteuerung und Koordinatenmessgeräte hat die PTB einen Längenkomparator entwickelt, der die bisher mögliche Messunsicherheit für Messlängen von 2 mm bis 610 mm deutlich verringert.**

Weltweit können die Abstände von Strukturen (als Längenmessungen, die auf das SI rückführbar sind) bisher nur mit Unsicherheiten von etwa 20 nm gemessen werden. Hochpräzise Positionsregelungen in Fertigungsprozessen und immer dichter gebaute integrierte Schaltungen erfordern jedoch

schon heute Längenmessungen mit kleineren Messunsicherheiten. Mit dem neuen Nanometerkomparator lassen sich die in Präzisions-Bearbeitungsmaschinen verwendeten Längenmesssysteme mit der geforderten geringen Messunsicherheit charakterisieren. Objekte mit einer Breite bis zu 450 mm können auf dem Komparator aufgelegt werden, so dass auch eindimensionale Strukturabstände auf zweidimensionalen Messobjekten wie z.B. Photomasken der Halbleiterindustrie bestimmt werden können.

Wegen der hohen Genauigkeitsanforderungen wurde der Komparator sehr aufwendig konstruiert und aufgestellt. So ist der Schlitten zum Verschieben der Messobjekte luftgelagert und mit Piezoaktoren versehen, um messtechnisch erfasste Füh-

*Fortsetzung auf Seite 2*

### Längenmessungen nanometergenau

(Fortsetzung von Seite 1)

rungsabweichungen der Luftlager zu kompensieren. Die Verschiebung wird mit einem speziellen Interferometeraufbau im Vakuum gemessen, wobei die Interferometerstrecke von einem Metallbalg gekapselt wird. Dadurch wird der Einfluss der Luftbrechzahl auf das Längenmessergebnis – der ansonsten die Messunsicherheit dominieren würde – praktisch eliminiert. Das Interferometer selbst besteht aus drei in Differenz angeordneten Referenzstrahlen mit Reflektoren am festen Gestell des Komparators, die die mechanisch und thermisch induzierten Verlagerungen zwischen Mikroskopbrücke und Interferometerstrahlteiler weitgehend kompensieren.

Erste Vergleichsmessungen an 200-mm-Strichmaßstäben mit anderen Längenkomparatoren innerhalb und außerhalb der PTB zeigen Übereinstimmungen von kleiner 30 nm, was etwa der Messunsicherheit dieser Komparatoren entspricht. In Kürze sollen mit dem neuen Nanometerkomparator Kalibrierdienstleistungen mit Messunsicherheiten unter 10 nm angeboten werden. Durch weitere Optimierungen des Komparators wird eine Messunsicherheit des Komparators unter 5 nm angestrebt. Da aufgrund der Länge der Messzirkel Messunsicherheiten deutlich unter 1 nm selbst für

kurze Messlängen nicht realistisch erscheinen, wird in der PTB für Messlängen unter 2 mm eine weitere Messeinrichtung vorbereitet. Erste Untersuchungen für diese Messeinrichtung werden im Beitrag „Verbindung von Rastertunnelmikroskop und Röntgeninterferometer“ (S.3) vorgestellt.

Weitergehende Informationen von J. Flügge,  
Fax: (05 31) 592-52 05,  
E-Mail:  
jens.fluegge@ptb.de



Der neue Nanometerkomparator

## Kontrastmittel für die Kernspin-Tomographie

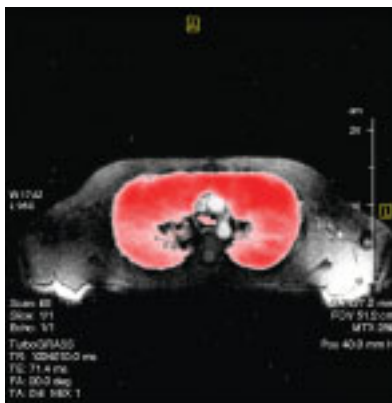
**In der PTB wurde eine Apparatur zur Erzeugung von hyperpolarisiertem Xenon für kernspintomographische Aufnahmen der Lunge, des Gehirns und möglicherweise noch weitere medizinische Diagnoseverfahren entwickelt.**

Kontrastmittel werden in der medizinischen Bildgebung sowohl zur anatomischen Darstellung als auch bei funktionellen Untersuchungen eingesetzt, um den Aussagewert der Abbildung zu erhöhen. So ist beispielsweise die Bildgebung der Lunge mittels konventioneller Kernspintomographie schwierig, da das Protonensignal aus dem Lungengewebe zeitlich sehr schnell abfällt und die in der Lunge befindliche Luft kein Signal liefert. Die stabilen Edelgas-Isotope ( $^3\text{He}$ ,  $^{129}\text{Xe}$ ) lassen sich durch optisches Pumpen mit Laserstrahlung (hyper-)polarisieren, das heißt, die Kernspins werden in hohem Maße ausgerichtet. Derartig präparierte Edelgase ( $\text{HpHe}$ ,  $\text{HpXe}$ ) lassen sich als Kontrastmittel für die Kernspintomographie der Lunge und der funktionellen Diagnostik des Gehirns einsetzen.

Mehreren Forschergruppen in Europa (zum Beispiel an der Universität Mainz) und Amerika ist es bereits gelungen, nach Einatmen von  $\text{HpHe}$  die Lunge mit Hilfe der Kernspintomographie abzubilden und dynamische Studien der Lungenfunktion durchzuführen.  $^3\text{He}$ , als Abfallprodukt der Tritiumgewinnung, ist ein auf der Erde nicht natürlich vorhandenes Isotop. Dagegen kommt  $^{129}\text{Xe}$  mit einer Häufigkeit von 26 % in natürlichem Xenon-Gas vor. Xenon löst sich sehr gut in Blut und Gewebe, beispielsweise Hirngewebe, und eröffnet damit weitergehende medizinische Anwendungen.

In der PTB wurde eine Apparatur zur Erzeugung ausreichender Mengen (0,5 l/h) von  $\text{HpXe}$  mit einem Polarisationsgrad von 10 % bis 20 % (bezogen auf  $^{129}\text{Xe}$ ) aufgebaut, um eine Abbildung der Lunge sowie eine (zeitaufgelöste) spektroskopische Bildgebung des Gehirns mit Hilfe der Kernspintomographie durchzuführen. Ziele sind einerseits das Erschließen neuer medizinischer Anwendungsgebiete von  $\text{HpXe}$ , andererseits der quantitative Vergleich von Lungenbildern, welche mit  $\text{HpHe}$  bzw.  $\text{HpXe}$  aufgenommen wurden. Hierdurch soll geklärt werden, ob und für welche medizinischen Anwendungen  $\text{HpHe}$  durch  $\text{HpXe}$  bei der Lungenbildung ersetzt werden kann. Es ist darüber hinaus denkbar, dass  $\text{HpXe}$  und  $\text{HpHe}$  auch als Kontrastmittel in der SQUID-Messtechnik Verwendung finden können.

Weitergehende Informationen von W. Kilian,  
Fax: (030) 34 81-505,  
E-Mail:  
wolfgang.kilian@ptb.de

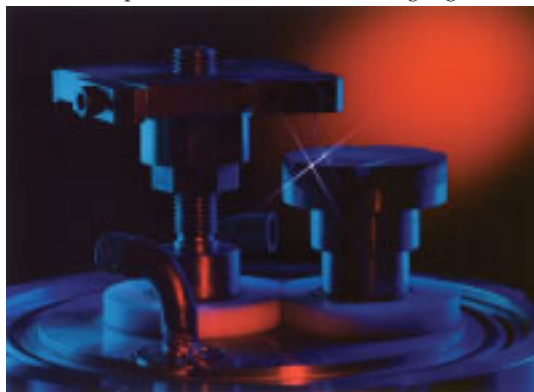


Überlagerung der  $^{129}\text{Xe}$  Lungenbilder (rot, Auflösung in der Ebene  $4 \times 4 \text{ mm}^2$ ) mit konventionellen Protonenbildern (weiß).

# Eigensicher trotz höherer Drücke

Die chemische Industrie kann in Zukunft elektrische Geräte einsetzen, die auch für den Betrieb oberhalb atmosphärischer Bedingungen zertifiziert sind. Dies ermöglichen aktuelle Untersuchungen der PTB, in denen das Konzept der Eigensicherheit auch auf höhere Temperaturen und Drücke ausgedehnt wurde.

Wenn in einem elektrischen Gerät trotz möglicher Funken keine Explosion gezündet werden kann, gilt das Gerät als „eigensicher“. Dabei bedeutet Eigensicherheit, dass die maximal mögliche Energie in einem Stromkreis so weit begrenzt wird, dass entstehenden Funken nicht genügend Energie zur Verfügung gestellt wird, um explosionsfähige Brenngas/Luft-Gemische, wie sie in der chemischen oder petrochemischen Industrie gang und



Auf einem solchen Funkenprüfgerät schleifen Wolframdrähte auf einer rotierenden Cadmiumscheibe und erzeugen dabei elektrische Funken – bis in dem umgebenden Gasgemisch eine Explosion ausgelöst wird.

gäbe sind, explodieren zu lassen.

Entscheidend für das Merkmal „eigensicher“ sind Grenzkurven, die angeben, unter welchen System- und Umgebungsbedingungen eine Zündwahrscheinlichkeit von  $10^{-3}$  besteht. In diesem Zusammenhang hat die PTB das Zündverhalten von elektrischen Funken und die möglicherweise daraus entstehenden Explosionen auch für höhere Temperaturen und Drücke untersucht. Mit dem Funkenprüfgerät wurden die relevanten Grenzkurven für verschiedene Gasgemische auch oberhalb atmosphärischer Bedingungen ermittelt. Mit den gewonnenen Ergebnissen kann die PTB eigensichere Geräte für Temperaturen bis 100 °C und Drücke bis 5 bar prüfen und anschließend zertifizieren.

Die Vorteile für die Hersteller der elektrischen Geräte und damit auch für die chemische Industrie sind eindeutig: Außerhalb des Gültigkeitsbereichs der Zertifizierung konnten die Hersteller keine Garantie für den gefahrlosen Betrieb dieser Geräte übernehmen und die chemische Industrie musste die Geräte wenn überhaupt, dann unter eigener Verantwortung einsetzen. Die neuen Ergebnisse zur Eigensicherheit hingegen führen zu erweiterten Zertifizierungen und damit zu einem höheren Sicherheitsstandard in der chemischen Industrie.

Weitergehende Informationen von M. Thedens,  
Fax: (0531) 592-34 15,  
E-Mail:  
martin.thedens@ptb.de

# Verbindung von Rastertunnelmikroskop und Röntgeninterferometer

In einem Messaufbau wurden ein Rastertunnelmikroskop (als das eigentliche Messinstrument) und ein Röntgeninterferometer (als Längenstandard) kombiniert. Mit einer solchen Apparatur können Normale selbst mit lateralen Strukturen atomarer Ausdehnung sehr genau kalibriert werden.

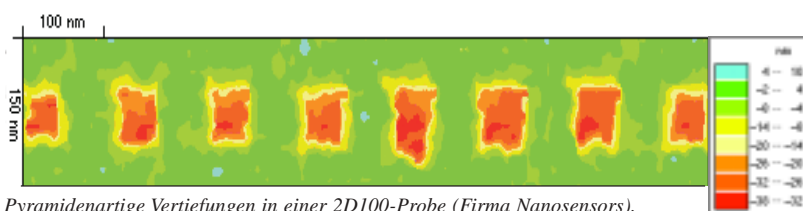
In der Nanotechnologie werden atomare Strukturen üblicherweise mit einem hochauflösenden Rastertunnelmikroskop untersucht. Auch in dem neuen Messaufbau dient ein Rastertunnelmikroskop dazu, die Topographie der Probenoberfläche zu erfassen. Als hochpräziser Verschiebetisch wird ein (in der PTB hergestelltes) Röntgeninterferometer aus versetzungsfreiem, einkristallinem Silicium eingesetzt. Damit werden die Proben in periodi-

schen Schritten von 0,192 nm (dem Abstand der Silicium-(220)-Ebenen) bewegt. Dieser Abstand ist seit einigen Jahren sehr genau auf die SI-Basiseinheit Meter rückgeführt. Ein weiterer Vorteil der Konstruktion: Die periodische Abfolge der atomaren Ebenen ist frei von Nichtlinearitäten, die (zum Beispiel bei einem Laserinterferometer) zu berücksichtigen sind, wenn man Strukturen mit Ausdehnungen von Bruchteilen der optischen Wellenlänge messen will.

Der experimentelle Aufbau in der PTB zeigt eine äußerst gute Stabilität und damit auch eine sehr gute Reproduzierbarkeit der Ergebnisse. Erste Untersuchungen wurden an einem zweidimensionalen Gitter mit mehreren in die Oberfläche geätzten kleinen Gruben durchgeführt, deren nomineller lateraler Abstand 100 nm betrug (einem so genannten 2D100-Gitter). Für diesen Abstand lieferte die Kalibrierung mit dem Silicium-Gittermaßstab über einen Messweg von 0,8 µm einen Wert von  $(100,12 \pm 0,36)$  nm.

Aufgrund dieser Studien, die die PTB zusammen mit dem National Physical Laboratory (NPL), Teddington, U. K., durchgeführt hat, ist der Aufbau eines ständigen Messplatzes in der PTB geplant.

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



Pyramidenartige Vertiefungen in einer 2D100-Probe (Firma Nanosensors), die mit der neuen Messgeräte-Kombination aufgenommen wurden.

# Neues Primärnormal für Flüssigkeitsmessungen

**Das neue hydrodynamische Prüffeld der PTB ist betriebsbereit. Die bisher erreichbaren Messunsicherheiten in der Mengen- und Durchflussmessung strömender Flüssigkeiten werden mehr als halbiert. Die Anlage ist damit ein weltweit einzigartiges Primärnormal für Flüssigkeitsmessungen.**

Industrie und Wissenschaft, aber auch Medizin, Umwelt- und Verbraucherschutz verlangen für die Messung von Durchfluss und Volumen bzw. Masse von Flüssigkeiten Genauigkeiten, für deren Garantie die Darstellung der entsprechenden Einheiten durch die PTB mit erweiterten Messunsicherheiten kleiner als 0,02 % erforderlich ist. International liegen hier die Bestwerte derzeit zwischen 0,04 % und 0,05 %.

Das neue hydrodynamische Prüffeld arbeitet mit dem Messgut Wasser und wird in einem Durchflussbereich von 0,3 m<sup>3</sup>/h bis 2100 m<sup>3</sup>/h die erforderliche Messunsicherheit von 0,02 % erreichen. So ergibt es sich sowohl aus

der Prognose des aufgestellten Messunsicherheitsbudgets als auch durch die technischen Abnahmen wichtiger Teilkomponenten. Die entscheidenden Voraussetzungen hierfür wurden bereits durch die messtechnische Konzeption der Anlage geschaffen, die zwei messtechnisch völlig unabhängige Verfahren miteinander kombiniert: Eine gravimetrisch arbeitende Messeinrichtung mit Wägesystemen (drei Waagen mit Höchstlasten von 30 t, 3 t und 300 kg) ist über den Messkreislauf mit einem geometrisch ausgemessenen Volumennormal (250-Liter-Rohrprüfstrecke) gekoppelt. Durch entsprechende Vergleichsmessungen beider Systeme ist es möglich, die Auswirkung von bisher kaum realistisch abschätzbaren Einflussgrößen auf die Messunsicherheit zu erkennen und zahlenmäßig zu erfassen. Ein solches Konzept wird auf diesem Gebiet erstmalig realisiert. Darüber hinaus sind zahlreiche weitere innovative Detaillösungen umgesetzt worden, um die angestrebten messtechnischen Parameter zu erreichen. So wurden beispielsweise neuartige konstruktive und messtechnische Konzepte für das Wägesystem, die Umschaltklappen und das Kalibrierverfahren für die Rohrprüfstrecke entwickelt.

Einer der Schwerpunkte der wissenschaftlichen und experimentellen Arbeiten am hydrodynamischen Prüffeld ist zur Zeit der exakte Nachweis der Messunsicherheit. Umfangreiche Forschungsarbeiten werden sich auch mit der Integration optischer Geschwindigkeitsmessverfahren in die Flüssigkeitsmessung beschäftigen. Darüber hinaus werden sich intensive Untersuchungen darauf konzentrieren, messgutunabhängige Transferverfahren und -normale zu entwickeln.



Messstrecken des Prüffeldes mit dem Wägesystem (im Hintergrund 30-t-Waage)

PTBnews 02.3  
Deutsche Ausgabe  
Dezember 2002

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](mailto:ptbnews@ptb.de)

Weitergehende Informationen von R. Engel,  
Fax: (05 31) 592-61 32,  
E-Mail:  
[rainer.engel@ptb.de](mailto:rainer.engel@ptb.de)

## Veranstaltungen

### European Vacuum Congress Berlin 2003

(8<sup>th</sup> European Vacuum Conference zusammen mit der 2. Jahrestagung der Deutschen Vakuum-Gesellschaft); Rathaus Schöneberg, Berlin, 23. bis 26. Juni 2003

Weitergehende Informationen:

K. Jousten, K. Wenzel, Fax: (030) 34 81-510,

E-Mail: [EVC@ptb.de](mailto:EVC@ptb.de), Internet: <http://evc-8.ptb.de>

### Temperatur 2003 (PTB-GMA-Fachtagung)

Berlin, 8. und 9. September 2003

Weitergehende Informationen:

J. Hollandt, E. Tegeler, Fax: (030) 34 81-503,

E-Mail: [Temperatur2003@ptb.de](mailto:Temperatur2003@ptb.de),

Internet: <http://www.ptb.de/temperatur2003>