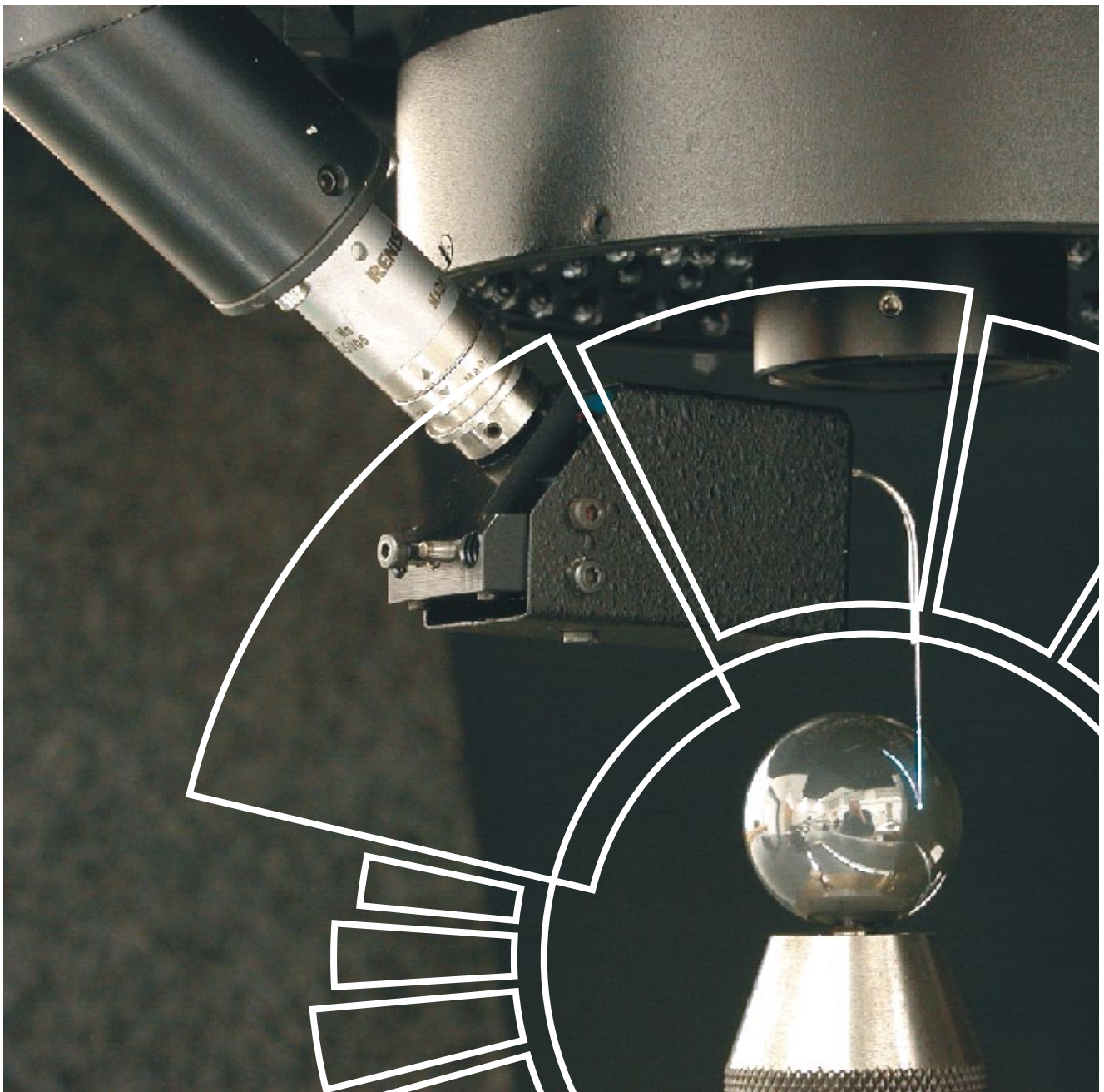


ABTEILUNG 5

Fertigungsmesstechnik



Fertigungsmesstechnik

In vielen technischen Wirtschaftszweigen bildet die Längenmesstechnik die Grundlage einer stabilen und nachhaltigen Produktion. Dabei ist die Rückführung solcher Messungen auf die Einheit Meter Voraussetzung für eine global verteilte Fertigung, weil sie das gleiche Maß an jedem Ort der Erde garantiert. Qualitätssysteme basieren auf diesem Nachweis einer ununterbrochenen messtechnischen Kette bis hin zu den nationalen Normalen.

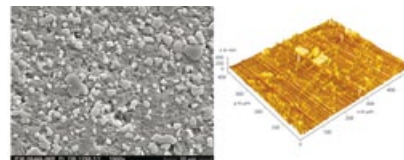
Automobil- und Maschinenbau

Automobil- und Maschinenbau sind wichtige Stützen der Volkswirtschaft. Internationale Arbeitsteilung und eine komplexer werdende Fertigung in diesen Wirtschaftsbereichen können nur funktionieren, wenn mit höchster Genauigkeit gearbeitet wird. Beispielsweise muss im Fahrzeugbau exakt und zuverlässig gefertigt werden, um die engen Bauteiltoleranzen von wenigen Mikrometern einhalten zu können, wie sie unter anderem in Komponenten der Antriebsstränge oder der Motoren gefordert werden. Die Fertigung der wesentlichen Geometrien wird häufig mit 3D-Koordinatenmessgeräten überwacht, die sich dazu aufgrund ihrer Universalität in besonderer Weise eignen.

Für die Rückführung auf die Einheit Meter setzt die Industrie in weiten Bereichen Parallel-Endmaße ein. Die PTB bietet hier hochpräzise interferometrische Kalibrierungen



Koordinatenmessgeräte (KMG) sind wichtige Hilfsmittel in der industriellen Messtechnik. Hier wird ein KMG beim Kalibrieren eines Motorblocks gezeigt, der als werkstückähnliches Kalibrier-normal im Deutschen Kalibrierdienst (DKD) verwendet wird.



(Quelle: Uni Hannover, mit Genehmigung der Daimler AG)

Oberfläche einer Si/Al-Zylinderlauffläche; links: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme; rechts: Mit einem Rasterkraftmikroskop gemessene Topografie über eine Fläche von 500 µm × 400 µm.

an. Mit zunehmender Miniaturisierung und dem Streben nach höherer Messgeschwindigkeit und Messpunktedichte werden neben der antastenden Messtechnik die optischen Sensoren immer wichtiger. Auch industrielle Computertomografen haben Einzug in die Fertigungsmesstechnik gehalten. Ihre Technik ermöglicht erstmals eine zerstörungsfreie, volumetrische Erfassung der Bauteile und die dimensionelle Erfassung von inneren und äußeren Strukturen. In enger Kooperation mit der Industrie entwickelt die PTB anwendungsgerechte Normale, hochgenaue Messverfahren und universelle Methoden zur Ermittlung von aufgabenspezifischen Messunsicherheiten.

Die Oberfläche von Bauteilen muss bestimmte Funktionen erfüllen, wie z. B. die Lackierbarkeit von Blechoberflächen, das Ölhaltevermögen von Zylinderlaufbahnen in Verbrennungsmotoren oder das Reibverhalten in Getrieben. Um diese Funktionen sicherzustellen, müssen die dafür spezifizierten Oberflächenkenngrößen im Fertigungsprozess gemessen werden. ■

Luft- und Raumfahrt

Während in der Raumfahrtindustrie überwiegend hochkomplexe Einzel Exemplare oder Kleinserien an der Grenze des technisch Machbaren entwickelt werden, steht in der Luftfahrtindustrie die Fertigung von großen Stückzahlen hoher Güte im Mittelpunkt. Hier sind es die großen Strukturen mit Abmessungen von bis zu mehreren zehn Metern, die eine Herausforderung an Fertigungsprozesse und die damit verbundene Messtechnik darstellen. Häufig werden dazu mobile Messgeräte eingesetzt. Das sind Systeme, die auf räumlicher Winkelmessung (Triangulation), auf einer Kombination von Winkel- und Abstandsmessung und auf reiner Abstandsmessung (Trilateration) beruhen. Zur präzisen interferometrischen Kalibrierung solcher Längenmessgeräte verfügt die PTB über eine hochgenaue, 50 Meter lange geodätische Basis. ■



Große Messbereiche flexibel erfassen: Theodoliten-system (vorne links) im Einsatz bei dimensionellen Messungen an einem Flugzeugbauteil.

Mikrosystemtechnik

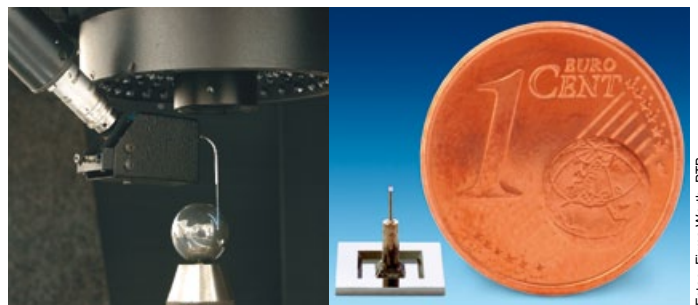
In Mikrosystemen wirken Sensoren, Aktoren und Datenverarbeitung auf kleinstem Raum zusammen. Beispiele sind Beschleunigungs- und Drehratensensoren zur Auslösung von Airbags, Sensoren in Stabilisierungs- und Navigationssystemen, Instrumente der minimalinvasiven Chirurgie wie Endoskopsysteme oder auch chemische Sensoren für die Lebensmittelüberwachung.

Wie auch in den konventionellen Technologien ist die dimensionelle Messtechnik hier das wichtigste Mittel der Qualitätssicherung. Ein wesentliches Merkmal mikrosystemtechnischer Komponenten sind ihre im Vergleich zu Halbleiterbauelementen größeren vertikalen Abmessungen und hohen Aspektverhältnisse. Dimensionelle Messsysteme aus der Halbleiterfertigung sowie konventionelle Oberflächenmessgeräte sind deshalb nur begrenzt einsetzbar. Es werden Mikromesssysteme für echte dreidimensionale Messungen benötigt, mit reduzierten Abmessungen, insbesondere der Tastelemente.

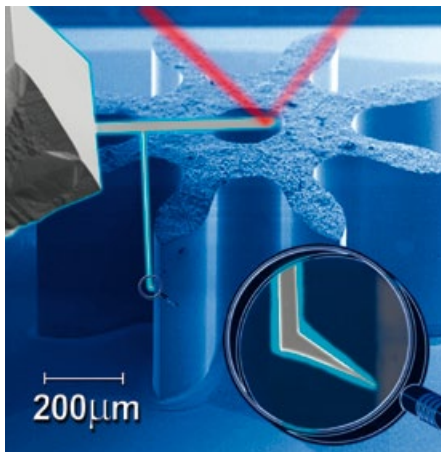
Ein taktil-optischer 3D-Fasertaster für Mikrostrukturen, der in der PTB entwickelt wurde, stellte die erste praktische Lösung des Problems dar. Der kleinste erhältliche Tastkugel-

durchmesser beträgt derzeit 15 μm .

Für spezielle Aufgabenbereiche werden – zusammen mit Instituten der Technischen Universität (TU) Braunschweig – mikromechanische Tastsysteme entwickelt. Ein erfolgreiches Beispiel dafür ist der 3D-Mikro-Taster (Abbildung), der die Antastung von Mikrostrukturen mit Auflösungen im Nanometerbereich ermöglicht. ■



Kleinste Teile müssen gemessen werden; links: Fasertaster (industrielle Version), rechts: Mikrotaster, eine Entwicklung des Instituts für Mikrotechnik der TU Braunschweig (Membranchip) zusammen mit der PTB.



„Zusammengesetzter Mikrotaster“ zur Antastung von Stirn- und Seitenflächen eines Mikrozahnrades. Der Lichtstrahl dient zur Detektion der Verbiegungen des Cantilevers eines Rasterkraftmikroskops. Das eingesetzte Bild zeigt die Tastspitze.

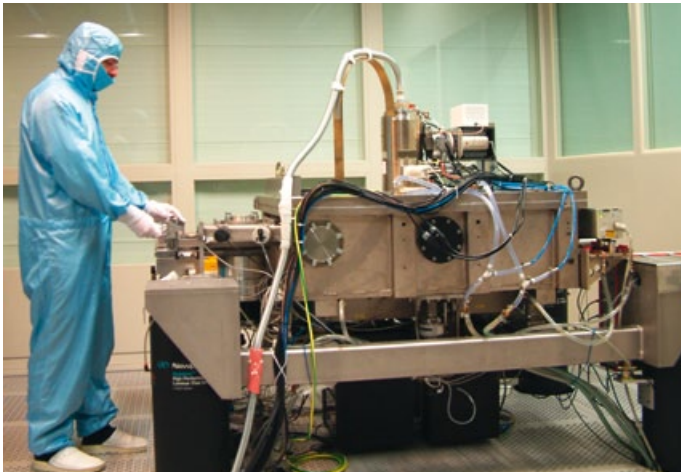
Nanotechnologie

Strukturen oder Partikel mit Abmessungen unterhalb von 100 Nanometern zeigen oft Eigenschaften, die sich von denen des Vollmaterials sehr stark unterscheiden. Diese dimensionellen Eigenschaften sind sehr häufig funktionsrelevant und eine adäquate, rückgeführte Messtechnik für die industrielle Produktion ist hier unerlässlich. Beispiele für den Einsatz solch kleiner Strukturen sind Quantenpunkte in der Optik, magnetische Nanopartikel in der medizinischen Therapie, Kohlenstoff-Nanoröhrchen für die Informationstechnologie und zur Verbesserung mechanischer Eigenschaften von Kompositwerkstoffen oder Nanopartikel zur Verbesserung von Oberflächeneigenschaften.

Die PTB hat frühzeitig das Potenzial von hochauflösenden Rastersondenmikroskopen für die Messtechnik erkannt und das Rasterkraftmikroskop (Scanning Force Microscope, SFM) vom rein bildgebenden Gerät zu einem quantitativen Messinstrument weiterentwickelt. Mit den SFM können heutzutage kleinste Strukturen aus dem Bereich der Mikrosystemtechnik, der Halbleitertechnik, der Biologie und der Chemie abgebildet und gemessen werden.

Mit den in der PTB entwickelten, metrologischen SFM werden Normale für Industrie und Forschungsinstitute kalibriert, um so das „richtige Maß“ auch im Nanometerbereich sicherzustellen.

Durch Entwicklung neuer Tastsysteme kann man den Anwendungsbereich für diese Rasterkraftmikroskope erweitern und Lösungsmöglichkeiten für bislang ungelöste Messaufgaben anbieten. In der PTB wurde ein Taster entwickelt, der quasi „um die Ecke misst“. Durch kleine Änderungen in der Software des Messgerätes wird so aus einem normalen Rasterkraftmikroskop ein vollwertiges, 3D-fähiges Messsystem. ■



Nanostrukturen auf größeren Substraten messen – die Kombination von Niederenergie-Elektronenmikroskop, großer Probenkammer und laserinterferometrisch kontrolliertem x-y-Positioniertisch im Elektronenoptischen Metrologiesystem erlaubt präzise dimensionelle Messungen an Masken- und Waferstrukturen.

Halbleiterindustrie

Die Halbleiterindustrie ist das bekannteste Beispiel dafür, wie sich die Leistung von Produkten durch immer kleinere Strukturen beständig steigern lässt. Strukturbreiten und die x-y-Koordinaten sind dabei wesentliche dimensionelle Messgrößen an den Strukturen auf Lithografiemasken und Siliziumscheiben (Wafers). In der Abteilung 5 konzentrieren sich die Aktivitäten in der Strukturbreitenmetrologie auf hochauflösende mikroskopische Messverfahren wie die Rasterelektronen- und Rastersondenmikroskopie. Zur Längen- und Koordinatenmessung werden spezielle Komparatoren eingesetzt. Misst man beispielsweise Längenteilungen von 300 mm mit einem Vakuum-Längenkomparator, sind Unsicherheiten von nur wenigen Nanometern erzielbar. Weiterentwicklungen sollen künftig Unsicherheiten unterhalb eines Nanometers erlauben.

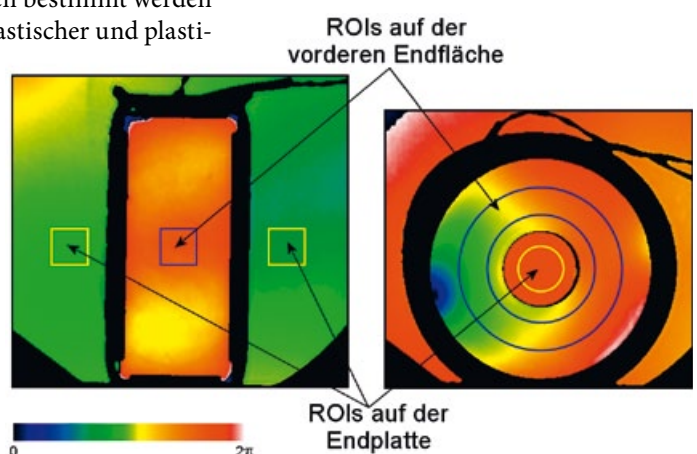
Die Winkelmesstechnik bildet die Basis für neue Methoden zur präzisen Topografiemessung auch großer Substrate in der Halbleiterindustrie, bei Synchrotronen und als Ebenheitsstandard in der PTB. Die hierfür erforderlichen Winkelmessgeräte und Normale können in der Abteilung mittels hochgenauer Primärnormale kalibriert werden. ■

Ein Blick auf Materialeigenschaften – Härte und thermische Ausdehnung

Die Bestimmung der Härte zählt zu den wichtigsten Werkstoffprüfungen zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften von eingesetzten Materialien. Weit verbreitet sind konventionelle Härtemessverfahren nach Rockwell, Vickers und Brinell. Hierbei wird in der Probe ein Härteeindruck erzeugt, dessen Abmessungen bestimmt werden und aus denen die Härte berechnet wird. Zur Messung weiterer elastischer und plastischer Eigenschaften von Werkstoffen werden bei zunehmender und abnehmender Prüfkraft die Eindringtiefe und die Prüfkraft gemessen. Mit dieser sogenannten instrumentierten Eindringprüfung können insbesondere im Nanobereich (Eindringtiefen $\leq 0,2 \mu\text{m}$) die mechanischen Eigenschaften ultradünner Schichten gemessen werden, die zum Beispiel in der Mikroelektronik, Mikrosystemtechnik und Technischen Optik benötigt werden.

Zur Rückführung der Härte werden im Deutschen Kalibrierdienst (DKD) und in der Industrie Härtevergleichsplatten benutzt, die in der PTB kalibriert werden. Darüber hinaus stellt die PTB Härtevergleichsnormale und Messtechniken für Kraft, Eindringtiefe und Form der Eindringkörper zur Verfügung.

Bei Fertigungsprozessen in der Halbleiterindustrie ist ständig steigende Präzision erforderlich; daher müssen die Eigenschaften eingesetzter Hightechmaterialien, wie die dimensionelle Stabilität und die thermischen Ausdehnungseigenschaften, genau bekannt sein. Die PTB setzt dafür in ihrem Präzisionsinterferometer die Methode der absoluten Längenbestimmung mittels optischer Interferometrie ein. Dazu wird die Länge, aber auch die Topografie von makroskopischen Proben als Funktion der Temperatur bzw. der Zeit gemessen. Aus den Ergebnissen lässt sich der Ausdehnungskoeffizient als Funktion der Temperatur berechnen. Außerdem erhält man quantitative Aussagen hinsichtlich Homogenität der thermischen Ausdehnung, Kompressibilität, Längenrelaxationen und Langzeitstabilität von Proben. ■



Interferentielle Phasentopografie zweier verschiedenartiger Proben. Links: quaderförmige Probe (Mitte, gelb/rötlich), deren obere Endfläche relativ zu einer Endplatte gemessen wird, die am unteren Ende ‚angesprengt‘ wurde. Rechts: gleiches Messverfahren für eine zylinderartige Probe. Eingezeichnet sind die Bereiche, die für die Längenmessung ausgewertet werden.

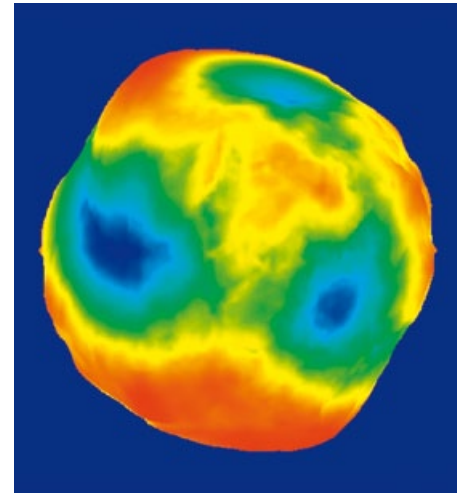
Fundamentalkonstanten

Die Generalkonferenz für Maß und Gewicht (CGPM), das höchste internationale Gremium auf dem Gebiet der Einheiten und der Messtechnik, hat beschlossen, die Einheiten Kilogramm, Ampere, Kelvin und Mol auf der Grundlage geeigneter Fundamentalkonstanten neu zu definieren. Dies setzt höchste Anforderungen an die Bestimmung der Konstanten voraus. Die Abteilung Fertigungsmesstechnik ist an zwei Projekten beteiligt, die sich die Neubestimmung der Avogadro-Konstante N_A beziehungsweise der Boltzmann-Konstante k_B zum Ziel gesetzt haben.

Bei dem Avogadro-Projekt geht es darum, eine präzise polierte Kugel mit einer Masse von ca. 1 kg aus hoch angereichertem, fast isotopenreinem (99,99 %), einkristallinem ^{28}Si -Material sowohl bezüglich ihrer mikroskopischen als auch ihrer makroskopischen Dichte mit höchster Genauigkeit zu charakterisieren und hieraus die Avogadro-Konstante mit einer relativen Unsicherheit von $2 \cdot 10^{-8}$ zu bestimmen.

In der Abteilung Fertigungsmesstechnik wird das Volumen der Siliziumkugel mit einem Durchmesser von etwa 93 mm mit einer angestrebten relativen Messunsicherheit von $1 \cdot 10^{-8}$ bestimmt. Das geschieht mit Hilfe eines speziell dafür entwickelten Kugelinterferometers.

Ziel des Boltzmann-Projektes ist es, über eine verbesserte Kenntnis der Boltzmannkonstante k_B die thermodynamische Temperaturskala neu zu definieren. In der Abteilung Fertigungsmesstechnik werden hierfür dimensionelle Präzisionsmessungen an Kolben-Zylinder-Paaren für Druckwaagen durchgeführt. Bei der Bestimmung der effektiven Kolbenfläche dürfen die Messunsicherheiten nicht größer sein als 10^{-7} – ebenfalls eine große Herausforderung an die Messtechnik, die den Einsatz speziell entwickelter Geräte erforderlich macht. ■



Mit dem Kugelinterferometer im Rahmen des Avogadro-Projektes gemessene Durchmesservariationen an einer Siliziumkugel. Die Farbvariation von Blau bis Rot visualisiert Abweichungen von der perfekten Kugelform von etwa 20 nm. Aus einer Vielzahl von Durchmesser-messungen wird das Volumen berechnet.

Entwicklung und Fertigung von Präzisionsgeräten

Die PTB steht im Bereich der Messtechnik weltweit in der ersten Reihe. Dies ist nur möglich, indem der Wissenschaftliche Gerätebau gemeinsam mit den zuständigen Fachbereichen laufend neue, höchst genaue Messgeräte und Versuchseinrichtungen entwickelt, konstruiert und fertigt. Je nach experimenteller Aufgabenstellung müssen dabei auch selten verwendete Werkstoffe verarbeitet werden – jenseits standardisierter Ver-



Orientierungsapparatur für einkristalline Werkstoffe. Das Gerät ist etwa zwei Meter hoch und wiegt rund zwei Tonnen.

fahren. Zur Bewältigung dieser Aufgaben werden modernste Fertigungstechnologien eingesetzt und rechnerunterstützte Systemkomponenten für die Konstruktion (CAD und FEM), Auftragsplanung und Fertigung (CAM) genutzt.

Um die hohen und kontinuierlich steigenden Anforderungen an die Fertigungsgenauigkeit und Werkstoffvielfalt erfüllen zu können, werden neue Technologien entwickelt, optimiert und erprobt. Aktuell wird beispielsweise an der Lösung der Frage gearbeitet, wie sich die Messung der Bauteile bereits in der Fertigungsmaschine mit hoher Genauigkeit durchführen lässt. Darüber hinaus werden Methoden entwickelt, um Mikrokomponenten herzustellen und auf den Mikrometer genau (und besser) zu montieren. Damit wird es auch für das Gebiet der Mikrotechnologie möglich, Maßverkörperungen zur Kalibrierung der Messgeräte bereitzustellen.

Die eigenen fertigungstechnischen Entwicklungen führen zu Präzisionsbauteilen, die in der erzielten Genauigkeit eine internationale Spitzenstellung einnehmen. Daher beteiligt sich der Wissenschaftliche Gerätebau auch an internationalen Projekten und ermöglicht so die Realisierung von außergewöhnlichen Komponenten für wissenschaftliche Experimente, wie z. B. das internationale „Microscope“-Experiment zur Überprüfung des Äquivalenzprinzips. ■

Fachbereiche und Kontakt

Abteilungsleiter

Dr. Harald Bosse
Telefon: (0531) 592-5010
E-Mail: harald.bosse@ptb.de

Fachbereich 5.1 Oberflächenmesstechnik

- Nanokraftmesstechnik
- Taktile Messtechnik
- Rauheitsmessverfahren
- Härte und Schichtdicken
- Nanostrukturen

Dr. Ludger Koenders
Telefon: (0531) 592-5100
E-Mail: ludger.koenders@ptb.de

Fachbereich 5.2 Dimensionelle Nanometrologie

- Längenteilungen
- Maskenmesstechnik
- Winkelmesstechnik
- Modellierung Rastermikroskopie
- Rastersondenmetrologie

Dr. Jens Flügge
Telefon: (0531) 592-5200
E-Mail: jens.fluegge@ptb.de

Fachbereich 5.3 Koordinatenmesstechnik

- Koordinatenmessgeräte
- Multisensorik, taktil, optisch
- Dimensionelle Computertomographie
- Kalibrierung von Maschinenelementen und 1D- bis 3D-Normalen
- Software-Validierung

Dr. Frank Härtig
Telefon: (0531) 592-5300
E-Mail: frank.haertig@ptb.de

Sekretariat

Gerhild Borek
Telefon: (0531) 592-5011
Telefax: (0531) 592-5015
E-Mail: gerhild.borek@ptb.de

Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Abteilung 5: Fertigungsmesstechnik
Bundesallee 100
38116 Braunschweig
www.ptb.de

Fachbereich 5.4 Interferometrie an Maßverkörperungen

- Kugelinterferometrie
- Thermische Ausdehnung stabiler Materialien
- Kalibrierung von Parallelendmaßen
- Mehrwelleninterferometrie
- Geodätische Längen
- Längenmessmaschinen

Dr. René Schödel
Telefon: (0531) 592-5400
E-Mail: rene.schoedel@ptb.de

Fachbereich 5.5 Wissenschaftlicher Gerätebau

- Konstruktion und Fertigung von Präzisionsmessgeräten und Versuchseinrichtungen
- Ultra-Präzisionsbearbeitung
- Fertigungstechnologie
- Oberflächentechnologie

Prof. Dr. Frank Löffler
Telefon: (0531) 592-5500
E-Mail: frank.loeffler@ptb.de

Die Abteilung Fertigungsmesstechnik der PTB sorgt mit einer Vielzahl von Messgeräten und -verfahren, angepasst an den jeweiligen Längenbereich und die Messaufgabe, für den Anschluss an die Einheit Meter. Zu diesem Zweck werden Grundlagen erforscht, Mess- und Kalibrierverfahren sowie Normale entwickelt und Messgeräte aufgebaut. Häufig geschieht dies in Kooperation mit Hochschulen, Anwendern in der Industrie und Messgeräteherstellern. Der Wissenschaftliche Gerätebau der PTB hilft hier mit der Konstruktion und Fertigung von speziellen Baugruppen und Präzisionsmessgeräten.

Die Abteilung bietet über einen Längenbereich, der sich von wenigen Nanometern bis zu mehreren hundert Metern erstreckt, eine Vielzahl von Dienstleistungen an. Dazu gehören Kalibrierungen, die überwiegend für die Deutsche Akkreditierungsstelle (DAkk) durchgeführt werden, die diese Messgrößen anschließend an die Industrie weitergibt. Das Angebot reicht weiter von validierten Messverfahren und Normalen über die Beratung bei messtechnischen Fragestellungen bis hin zur Konformitätsbewertung. Darüber hinaus entwickelt und prüft die Abteilung Messverfahren zur Sicherstellung der zulässigen Fehlergrenzen von Längenmessmaschinen für Rundholz, Fracht, Kabel, Textilien usw. Auch Härtemessung und Winkelmess-technik sind hier zuhause. ■

