



Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Nationales Metrologieinstitut

Abteilung 5

Fertigungsmesstechnik



Fertigungsmesstechnik

Wie genau kann man etwas fertigen? Wie rau ist eine Oberfläche? Wie groß ist ein Partikel? Wie gut greifen Zahnräder ineinander? Ist die Auswertung von Messdaten für die Qualitätskontrolle in der Fertigung „richtig“? Welche Themen müssen adressiert werden, um auch künftig für die industrielle Fertigung im Kontext von Industrie 4.0, Digitalisierung und Nachhaltigkeit die erforderliche zuverlässige Messtechnik bereitzustellen? Die Abteilung Fertigungsmesstechnik liefert Antworten auf diese und viele weitere Fragen.

Interferometrie

Die Meterdefinition

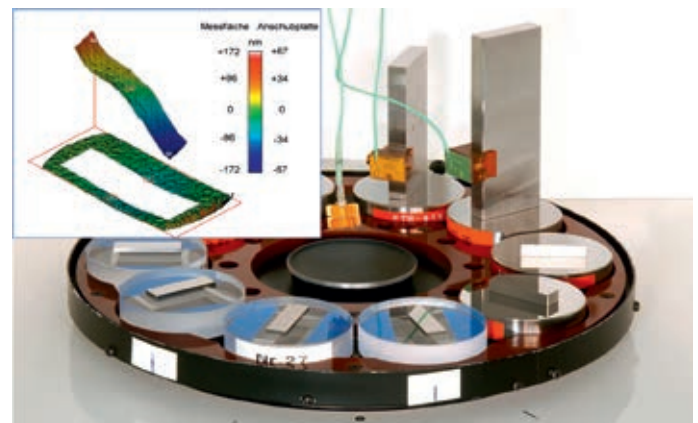
„Der Meter, Einheitenzeichen m, ist die SI-Einheit der Länge. Er ist definiert, indem für die Lichtgeschwindigkeit in Vakuum c der Zahlenwert 299 792 458 festgelegt wird, ausgedrückt in der Einheit m/s, wobei die Sekunde mittels $\Delta\nu_{Cs}$ definiert ist.“ Dies ist die aktuelle SI-Definition des Meters. Die Einheit der Länge wird bereits seit 1983 durch den festgelegten Wert einer Naturkonstante, der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum, definiert. Diese Herangehensweise wurde bei der Revision des SI-Systems im Jahr 2019 auch auf andere SI-Einheiten angewandt.

Basierend auf dieser Definition bieten sich zwei verschiedene Messverfahren für die praktische Darstellung von Längen an, die in der *Mise en pratique* für den Meter¹ beschrieben sind. Während sich für sehr große Längen die direkte Messung der Laufzeit von Lichtimpulsen anbietet, erlauben interferometrische Methoden, Längen im Labor- und Fertigungsumfeld mit hoher Genauigkeit zu messen. Voraussetzung hierfür ist unter anderem die genaue Kenntnis der Frequenz des Lichtes, welches mit der Bereitstellung optischer Frequenznormale von der Abteilung Optik der PTB geleistet wird. In der Abteilung Fertigungsmesstechnik werden darauf aufbauend spezielle Interferometer für verschiedene Anwendungen entwickelt und eingesetzt.

Interferometrische Längenmessungen

Ein Beispiel für die Entwicklung eines Messgerätes mit mehreren Messachsen stellt der Nanometerkomparator für die Kalibrierung von Längenmesssystemen und Strichmaßen dar. Bei diesem Messgerät sind die Hauptmessachsen der Interferometer im Vakuum angeordnet und Winkelabweichungen der Bewegungsachse werden interferometrisch erfasst und ausgegletzt, sodass sich sehr geringe Messunsicherheiten von 1 nm für Längen von 500 mm an geeigneten Strichteilungen erzielen lassen. Für fast alle industriellen Anwendungen erfolgt die interferometrische Längenmessung allerdings in Luft, sodass für genaue Längenmessungen der Einfluss der Luftparameter

auf die Luftbrechzahl erfasst werden muss. In der Abteilung Fertigungsmesstechnik werden Präzisionsmessungen zur Brechzahlbestimmung für verschiedene Lichtwellenlängen und Umgebungsbedingungen (Temperatur, Feuchte, ...) durchgeführt. Diese erlauben z. B. auch, sehr geringe Messunsicherheiten für die primäre Kalibrierung von Parallelendmaßen zu erreichen, die als Bezugsnormale für die fertigende Industrie eine wichtige Referenz darstellen.



Innenraum eines mit 10 angeschobenen Parallelendmaßen bestückten Interferometers. Im Teilbild ist das Ergebnis einer interferenzoptischen Messung an Mess- und Referenzfläche dargestellt.

Zudem werden spezielle Messverfahren entwickelt (Mehrwellenlängeninterferometrie), die eine Kompensation des Brechzahlinflusses der Luft als Ziel verfolgen. Dies ist besonders wichtig für Messungen über große Distanzen und unter rauen Umgebungsbedingungen, wie bei der Fertigung von großen Komponenten in der Raumfahrt- und Flugzeugindustrie oder Windenergieanlagen sowie Anwendungen in der Geodäsie. Der PTB stehen für diese Arbeiten eine 50 m lange geodätische Basis sowie eine 600 m lange Außenmessstrecke zur Verfügung.

Die präzise Erfassung von Positionen im Raum ist eine besondere Herausforderung, u. a. für die Bestimmung der Abweichungen von Bewegungsachsen an 3D-Koordinatenmessgeräten und Mehrachs-Werkzeugmaschinen. Die PTB entwickelt hierfür spezielle Messsysteme, oftmals in enger Kooperation mit Partnern aus der Industrie.

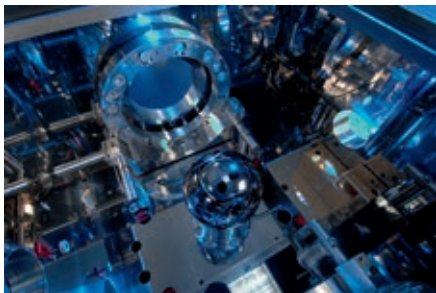
¹ siehe <https://www.bipm.org/utls/en/pdf/si-mep/SI-App2-metre.pdf>

Präzisionsinterferometrie für die Metrologie

Die höchsten Anforderungen an die Präzisionsinterferometrie resultieren aus der Volumenbestimmung von einkristallinen Silizium-Kugeln für die Darstellung der Masseneinheit nach der 2019 erfolgten Revision des SI. Hierzu wurden zwei spezielle Fizeau-Interferometer mit sphärischen Wellenfronten, sogenannte Kugelinterferometer, entwickelt. Die hierfür an Silizium-Kugeln von 1 kg Masse und ca. 47 mm Radius geforderten Messunsicherheiten liegen für den Radius bei ca. 0,2 nm.

Ein weiteres Beispiel für den Einsatz von Präzisionsinterferometrie für andere Messgrößen stellt die Bestimmung der effektiven Querschnittsfläche von Kolben-Zylinder-Systemen dar, die in Druckwaagen für die Darstellung der Messgröße Druck verwendet werden.

Industrielle Fertigungsprozesse, u. a. in der Halbleiterindustrie, sind mit ständig steigenden Anforderungen an die Genauigkeit konfrontiert. Die Maßhaltigkeit der eingesetzten Materialien ist hierbei besonders kritisch. Die PTB hat abbildende Präzisionsinterferometer realisiert, mit denen sich das Verhalten der absoluten Länge makroskopischer Proben als Funktion der Temperatur und der Zeit sub-nanometergenau bestimmen lässt, auch bis in den kryogenen Temperaturbereich (7 K) für Anwendungen im Weltraum.



Blick ins Innere eines Kugelinterferometers

Winkelmesstechnik

Die Darstellung des Winkels erfolgt in der PTB über den Vollkreis mittels des Winkelkomparators WMT 220, der über einen hochpräzisen optisch-inkrementellen Teilkreis mit 16 Abtastköpfen verfügt. Die Winkelmesstechnik bildet auch die Basis für neue Methoden zur präzisen Topografiemessung großer Substrate, z. B. bei Synchrotronen sowie für die Ebenheitsmesstechnik in der PTB. Die hierfür erforderlichen Winkelmeßgeräte und Normale werden in der Abteilung mittels des Primärnormals WMT 220 kalibriert, ergänzt durch die Messeinrichtung SAAC zur Kalibrierung räumlicher Winkel.

Oberflächen

Technische Oberflächen

Die taktile Oberflächenmesstechnik mittels Tastschnittgeräten ist ein etabliertes Verfahren für die Bestimmung von Rauheitskenngrößen auf unterschiedlichen technischen Oberflächen. Zunehmend werden allerdings auch berührungslose, in der Regel optische und schnellere Messmethoden im industriellen

Fertigungsumfeld eingesetzt. Ein aktueller Schwerpunkt liegt deshalb in der Entwicklung von Verfahren und Normalen, um die Ergebnisse verschiedener Messmethoden besser vergleichen zu können. Diese Aktivitäten schließen dabei auch die Entwicklung von Referenz-Software für die flächenhaften Rauheitsmessmethoden mit ein.

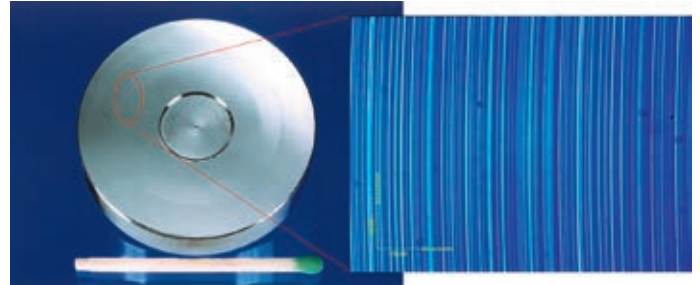


Foto eines mittels Diamantdrehens gefertigten superfeinen Raunormals sowie Darstellung der optisch gemessenen Oberflächentextur im Teilbild

Zudem erfolgen Entwicklungen von schnell messenden taktilen Sensoren auf Basis von speziellen langen Silizium-Cantilever-Systemen, die für verschiedene Anwendungen optimiert werden. Zunächst entwickelt für das Messen in schwer zugänglichen Geometrien, wie Einspritzdüsen und Mikrogasdüsen, findet zurzeit der Transfer in Werkzeug- und Messmaschinen statt. Neben der Sensitivität für geometrische Eigenschaften werden diese Mikrotaster künftig auch mechanische Materialeigenschaften messen können. Auch die Kalibrierung von Oberflächen-Schichtdicken gehört zum Aufgabengebiet der Abteilung.

Einkristalline Oberflächen

Ein aktuelles Arbeitsgebiet stellt die Nutzung von einkristallinen Materialien für die Oberflächenmesstechnik dar. Im Rahmen der Revision des SI wurden vom beratenden Komitee der Meterkonvention für die Länge Empfehlungen für die Anwendung des Silizium-Gitterparameters für die sekundäre Darstellung des Meters für Messungen in der Nanometrologie veröffentlicht. Die Empfehlung für die Nutzung des Silizium-Gitterparameters für Stufenhöhenmessungen im Bereich von bis zu 10 nm wurde maßgeblich durch präparative Arbeiten am Siliziummaterial und Untersuchungen der PTB mittels Rastersonden- und optischer Mikroskopiemethoden angeregt.

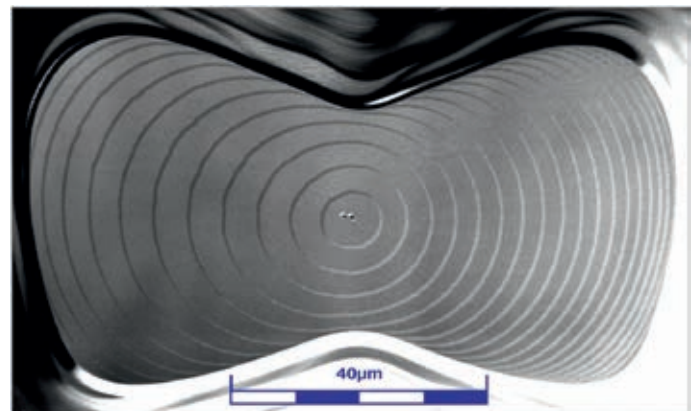


Abbildung einer Silizium-Oberfläche mit atomar glatten Stufen mittels konfokaler Mikroskopie

Zusätzlich werden Arbeiten verfolgt, das Kristallgitter auch für die Präparation von 2D-Gitterstrukturen mit definierten Gitterparametern im Bereich weniger Nanometer zu nutzen.

Härte

Die Bestimmung der Härte zählt zu den wichtigsten Verfahren zur Prüfung der mechanischen Eigenschaften von eingesetzten Materialien. Weit verbreitet sind konventionelle Härtemessverfahren nach Rockwell, Vickers und Brinell. Hierbei wird ein Härteeindruck erzeugt, dessen Abmessung bestimmt werden und aus denen die Härte berechnet wird. Zur Rückführung der Härte werden 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 dem zunehmenden Einsatz von Rasterkraftmikroskopen für Kraft-Weg-Messungen und daraus abzuleitenden Messgrößen in der Medizin, der Biologie und den Materialwissenschaften unterstützt die Abteilung Fertigungsmesstechnik durch Arbeiten zur Bestimmung der Kontaktfläche der verwendeten Tastspitzen.

Mikro- und Nanometrologie

Mikrostrukturen

Aus den geringen Abmessungen von Mikrokomponenten resultieren besondere Anforderungen an deren geometrische Charakterisierung. Es werden Mikromesssysteme für echte dreidimensionale Messungen benötigt, mit reduzierten Abmessungen insbesondere der Tastelemente. Hierzu werden taktil-optische 3D-Fasertaster für Mikrostrukturen mit Tastkugeldurchmessern bis zu 15 µm sowie auch MEMS-basierte Mikro-Messsysteme weiterentwickelt, beides in Kooperation mit Partnern aus der Industrie und den Wissenschaften.

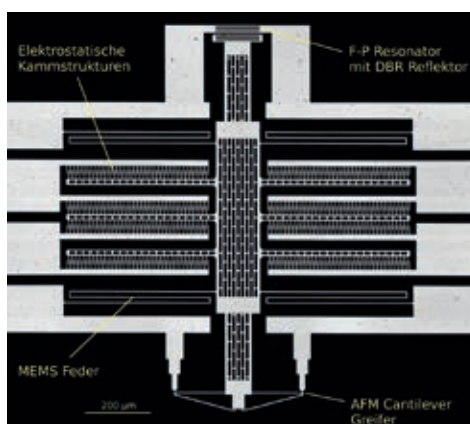


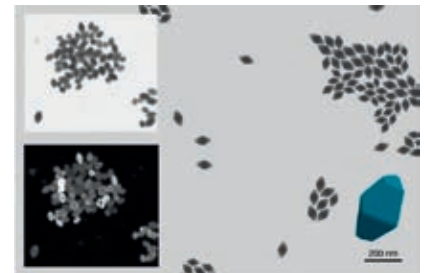
Abbildung eines MEMS-basierten Mikromesssystems

Eine sehr interessante Messmethode für die Charakterisierung von Mikrokomponenten, Mikrosystemen und kleinen komplexen Baugruppen stellt die industrielle Röntgen-Computertomografie dar, mit der auch schwer zugängliche und innenliegende Strukturen gemessen werden können.

Nanostrukturen und -partikel

Strukturen oder Partikel mit Abmessungen unterhalb von 100 Nanometern zeigen oft Eigenschaften, die sich von denen des Vollmaterials stark unterscheiden. Eine adäquate, rückgeführte Messtechnik für die industrielle Produktion ist auch hier unerlässlich. In der Abteilung Fertigungsmesstechnik werden hierfür primär mikroskopische Messmethoden, insbesondere die Rasterkraft- und die Elektronenmikroskopie, systematisch weiterentwickelt und für Kalibrierungen eingesetzt. Für die Messung der Geometrie von Nanostrukturen, die in der Halbleiterindustrie gefertigt werden, wird ein in der PTB entwickelter Antastmodus und spezielle Antastspitzen für die seitenwandempfindliche Rasterkraftmikroskopie (CD-AFM) angewendet.

Untersuchung von nanoskaligen Bipyramiden aus Titandioxid im Transmissionsmodus eines Rasterelektronenmikroskops: Hellfeld- und Dunkelfeld-Aufnahme (links oben bzw. unten) zusammen mit einem simulierten Bild und dem zugrundeliegenden dreidimensionalen Modell.



Die Elektronenmikroskopie in Transmission ist eine Methode, die auch in der Rasterelektronenmikroskopie eingesetzt wird, unter anderem für die Charakterisierung der Größe und Form sowie Größenverteilung von Nanopartikeln. Für die Messaufgaben in der Nanometrologie besteht zudem eine enge Kooperation mit der TU Braunschweig im Rahmen des Forschungsbaus LENA (Laboratory for Emerging Nanometrology).

3D-Koordinaten

Koordinatenmesssysteme

Koordinatenmessgeräte sind universell einsetzbare Messgeräte für die Bestimmung von funktionsrelevanten geometrischen Parametern an Komponenten aus allen Bereichen der industriellen Fertigung, von einfachen Regelgeometrien wie Ebene, Kugel und Zylinder bis hin zu komplexeren Elementen wie z. B. Zahnrädern und Gewinden. Auch in diesem Bereich gilt das taktile Antastverfahren als etablierte Referenz, sowohl bei Einzelpunktantastung als auch im sogenannten Scanning-Messmodus. Neue Herausforderungen bezüglich



Antastung eines Gewindelehrdorns, aufgespannt auf dem integrierten Drehtisch eines Koordinatenmessgerätes

der Vergleichbarkeit von 3D-Messergebnissen resultieren zum einen durch die zunehmende Integration von optischen und opto-taktilen Sensoren in Koordinatenmessgeräte, zum anderen durch neuere Koordinatenmessmethoden wie die industrielle Röntgen-Computertomografie oder auch optische Verfahren wie z. B. 3D-Laserscanner oder photogrammetrische Messsysteme. Die PTB entwickelt hier Methoden und Normale, um die Basis für eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse der unterschiedlichen Koordinatenmesssysteme sicherzustellen.

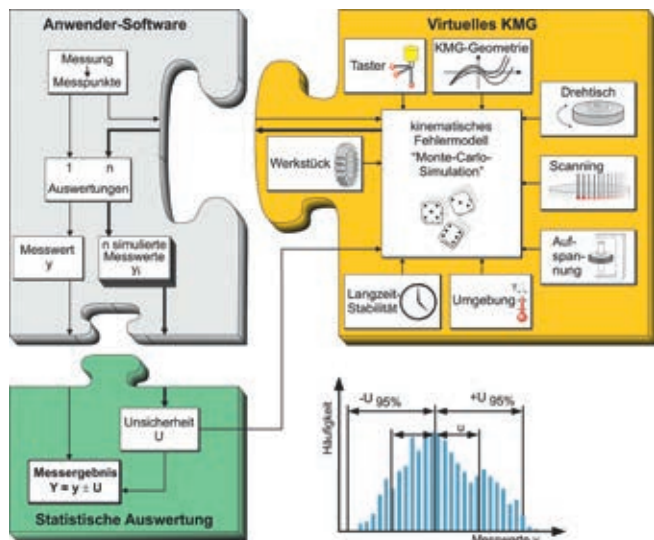
Ein aktuelles Schwerpunktthema der Koordinatenmesstechnik ist die Messung der Geometrie großer Bauteile. In dem neuen PTB-Kompetenzzentrum WIND wurde ein Groß-Koordinatenmessgerät mit einem Messvolumen von 5 m x 4 m x 2 m etabliert, mit dem sich Präzisionsmessungen auch an großen Bauteilen von Windenergieanlagen von bis zu 4 m im Durchmesser mit den geforderten geringen Messunsicherheiten im Bereich weniger Mikrometer durchführen lassen.



Das Groß-Koordinatenmessgerät im Kompetenzzentrum WIND

Digitalisierung

Für die Unterstützung der Industrie im Digitalisierungsprozess wird die in der PTB entwickelte „Virtual Coordinate Measuring Machine“ (VCMM) stetig an neue Herausforderungen angepasst und optimiert. Als „Digitaler Zwilling“

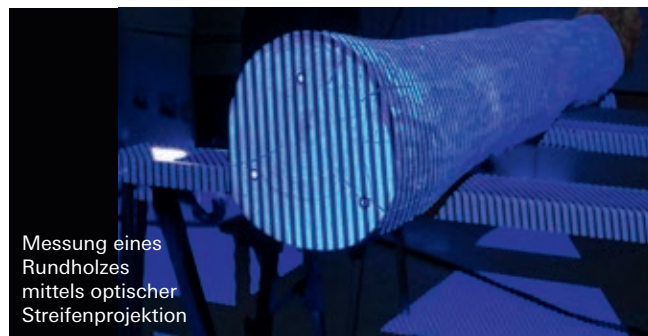


Prinzipbild des virtuellen Koordinatenmessgerätes (VCMM)

eines aufgabenspezifischen Messprozesses auf einem Koordinatenmessgerät ist es über Schnittstellen mit der Messgerätesoftware verbunden und dient simulationsbasiert der automatischen Messunsicherheitsbestimmung. Das Konzept des VCMM wird systematisch auf andere Messgeräteklassen im Rahmen des PTB-Kompetenzzentrums „Metrologie für virtuelle Messgeräte“ (VirtMet) erweitert. Im Zuge der Digitalisierung ist auch die Entwicklung des Online-Services für die Validierung von Auswertalgorithmen in der Messtechnik („Traceability for computationally-intensive metrology“, TraCIM) entstanden. TraCIM stellt Benutzern Testdaten zur Auswertung zur Verfügung und vergleicht die Ergebnisse mit Referenzdaten. Bei hinreichend kleinen Abweichungen wird ein Zertifikat ausgestellt.

Konformitätsbewertungen

Industrie, Handel und Gewerbe rechnen in vielen Fällen auf der Grundlage von Längenmessungen an Wirtschaftsgütern unterschiedlichster Art ab. Hierbei muss die Konformität der Geräte zur Messung von Längen und ihrer Kombination mit der Europäischen Messgeräterichtlinie (MID) bzw. dem Mess- und Eichgesetz bescheinigt sein. Optische Messmethoden sind auch zunehmend im gesetzlich geregelten Bereich des Messwesens im Einsatz, so z. B. zur Bestimmung der Abmessungen von Frachtstücken im Paketversand oder der Bestimmung des Volumens von Baumstämmen bei der Rundholzvermessung. Die PTB entwickelt hier Referenzmessverfahren, die im Rahmen der durchzuführenden Konformitätsbewertungen von eichpflichtigen Messgeräten als Bezug verwendet werden können.



Messung eines Rundholzes mittels optischer Streifenprojektion

Präzisionsfertigung

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 sowie Prüfkörper und Normale entwickelt, konstruiert und fertigt. Je nach experimenteller Aufgabenstellung müssen dabei auch selten verwendete Werkstoffe verarbeitet werden – jenseits standardisierter Verfahren. Zur Bewältigung dieser Aufgaben werden modernste Fertigungstechnologien eingesetzt und rechnerunterstützte Systemkomponenten für die Konstruktion (CAD und FEM), Auftragsplanung und Fertigung (CAM) genutzt.

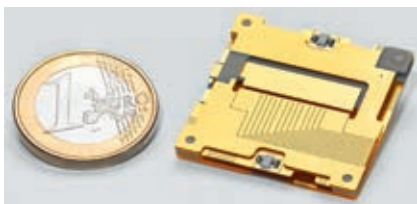
Um die hohen und kontinuierlich steigenden Anforderungen an die Fertigungsgenauigkeit und Werkstoffvielfalt erfüllen zu können, werden neue Technologien entwickelt, optimiert und erprobt. So wurden für die Neudefinition des Kilogramms sowohl die Fertigungstechnologien als auch die fertigungsbegleitende Messtechnik für die Herstellung von 1-kg-Si-Kugeln mit einer Formgenauigkeit von unter 20 nm entwickelt.

Darstellung der komplexen Fertigungskette für die Herstellung von Silizium-Kugeln



Auch für neuartige optische Uhren wurden die erforderlichen Fertigungsketten realisiert. Hierzu war es nötig, einen Stapel von unterschiedlichen Aluminiumnitrid-Wafern zusammenzustellen, wobei die einzelnen Wafer in mehreren Schritten geschnitten, beschichtet, strukturiert und geätzt wurden.

Abbildung einer in der PTB gefertigten Ionenfalle für die Anwendung in optischen Uhren



Neben den anspruchsvollen Aufgaben zur Herstellung von Messgeräten, Versuchseinrichtungen und Präzisionsbauteilen bildet der Wissenschaftliche Gerätebau auch Feinwerkmechaniker aus.

Abteilung Fertigungsmesstechnik

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. Die Abteilung bietet über einen Längenbereich, der sich von wenigen

Nanometern bis zu mehreren hundert Metern erstreckt, eine Vielzahl von Dienstleistungen an, die im Rahmen des CIPM MRA international anerkannt sind. Einen Schwerpunkt bilden hierbei Kalibrierungen, die für akkreditierte Kalibrierlaboratorien (DAkkS) durchgeführt werden, die diese Messgrößen anschließend an die Industrie weitergeben. Das Angebot reicht weiter von validierten Messverfahren und Normalen über die Beratung bei messtechnischen Fragestellungen bis hin zur Konformitätsbewertung für Geräte zur Messung von Längen und ihrer Kombination. Darüber hinaus wirkt die Abteilung Fertigungsmesstechnik bei der Erarbeitung von nationalen und internationalen Richtlinien und Normen sowie bei Begutachtungsaufgaben im Rahmen der Norm ISO / IEC 17025 mit. Der Wissenschaftliche Gerätebau unterstützt zudem die PTB mit der Konstruktion und Fertigung von speziellen Baugruppen und Präzisionsmessgeräten.

Abteilung 5 Fertigungsmesstechnik

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

Fachbereich 5.1

Oberflächenmesstechnik
Dr. Uwe Brand
Telefon: (0531) 592-5100
E-Mail: uwe.brand@ptb.de

Fachbereich 5.2

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

Fachbereich 5.3

Koordinatenmesstechnik
Dr. Karin Kniel
Telefon: (0531) 592-5300
E-Mail: karin.kniel@ptb.de

Fachbereich 5.4

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

Fachbereich 5.5

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



Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Bundesallee 100
38116 Braunschweig

Abteilung 5 | Fertigungsmesstechnik

Sekretariat

Kimberly Smith-Rösler

Telefon: (0531) 592-5011
Fax: (0531) 592-69-5011
E-Mail: kimberly.smith-roesler@ptb.de
<https://www.ptb.de/cms/ptb/fachabteilungen/abt5.html>

Stand: 2/2020



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:

Multi-Feature-Check: Prüfkörper aus Zerodur für Anwendungen in der Koordinatenmesstechnik, gefertigt im Wissenschaftlichen Gerätebau