Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Nationales Metrologieinstitut

Abteilung 5

Fertigungsmesstechnik

Abteilungsbericht 2019

Abteilung 5
Fertigungsmesstechnik
Dr. H. Bosse
Telefon: (0531) 592-5010
E-Mail: harald.bosse@ptb.de

Fachbereich 5.1
Oberflächenmesstechnik
Dr. U. Brand
Telefon: (0531) 592-5100
E-Mail: uwe.brand@ptb.de

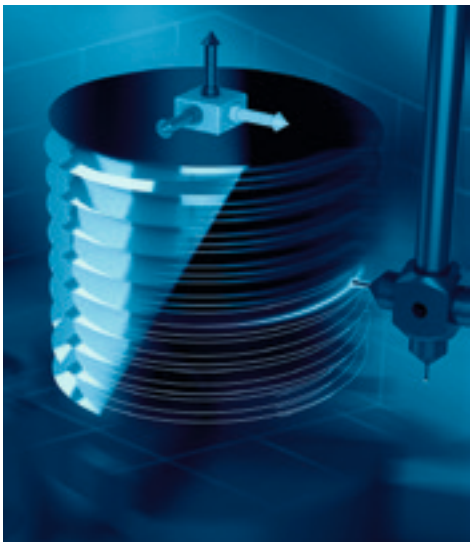
Fachbereich 5.2
Dimensionelle Nanometrologie
Dr. J. Flügge
Telefon: (0531) 592-5200
E-Mail: jens.fluegge@ptb.de

Fachbereich 5.3
Koordinatenmesstechnik
Dr. K. Kniel
Telefon: (0531) 592-5300
E-Mail: karin.kniel@ptb.de

Fachbereich 5.4
Interferometrie an Maßverkörperungen
Dr. R. Schödel
Telefon: (0531) 592-5400
E-Mail: rene.schoedel@ptb.de

Fachbereich 5.5
Wissenschaftlicher Gerätebau
Dr. F. Löffler
Telefon: (0531) 592-5500
E-Mail: frank.loeffler@ptb.de

Auszug aus dem PTB-Organigramm
(Dezember 2019)



Titelseite: Neuartiges Verfahren zur Kalibrierung von Gewinden unter der Verwendung eines ganzheitlichen Ansatzes

In der Abteilung *Fertigungsmesstechnik* werden Forschungs- und Entwicklungsarbeiten mit dem Ziel durchgeführt, den aktuellen sowie insbesondere den künftigen Bedarf von Industrie, Gesellschaft und Wissenschaft an messtechnischer Rückführung dimensioneller Größen mit den jeweils für die Anwendung geforderten Messunsicherheiten bestmöglich zu decken. Basierend auf den Ergebnissen dieser Forschungs- und Entwicklungsarbeiten werden neue und verbesserte messtechnische Dienstleistungen im Bereich der Kalibrierung von Normalen, der Validierung von messtechnischen Verfahren sowie der Prüfung von Algorithmen zur Messdatenauswertung angeboten und durchgeführt. Baumuster- und Entwurfsprüfungen für Längenmess-Maschinen und -Geräte gemäß der Europäischen Messgeräte-Richtlinie (MID) sowie von dimensionellen Messgeräten im Rahmen des Mess- und Eichgesetzes runden das Aufgabenspektrum der Abteilung ab. Darüber hinaus sind Mitarbeiter der Abteilung als Fach- und Systembegutachter für die Deutsche Akkreditierungsstelle (DAkkS) aktiv, wirken bei „peer reviews“ von Metrologieinstituten anderer Länder mit und engagieren sich in nationalen und internationalen Normungsgremien.

Die Bearbeitung der fachlichen Aufgaben der Abteilung erfolgt in den Fachbereichen *Oberflächenmesstechnik*, *Dimensionelle Nanometrologie*, *Koordinatenmesstechnik* sowie *Interferometrie an Maßverkörperungen*. Der Fachbereich *Wissenschaftlicher Gerätebau* der Abteilung unterstützt die gesamte PTB mit qualitativ hochwertigen Dienstleistungen in der Konstruktion, Fertigung und Montage von Prototyp-Messeinrichtungen sowie von Normalen.

Im Abteilungsbericht 2019 bilden die Beiträge der Abteilung Fertigungsmesstechnik für die Revision des Internationalen Einheitensystems (SI) - welches auf den festgelegten numerischen Werten der definierenden Konstanten beruht - den Schwerpunkt. Die Arbeiten für die Präzisions-Bestimmung der Avogadro-Konstanten N_A sowie der Boltzmann-Konstanten k stehen bei den Beiträgen der Abteilung Fertigungsmesstechnik im Vordergrund. Es wird aber auch kurz die Überarbeitung der *mise en pratique* für die Längeneinheit Meter diskutiert, in der auf die bei interferometrischen Längenmessungen in der Anwendung zu berücksichtigenden Einflüsse auf die Messunsicherheit eingegangen wird. Schließlich wird in der neuen *mise en pratique* für Längenmessungen in der Nanometrologie das Kristallgitter von Silizium mit dem sehr genau bekannten Silizium-Gitterparameter für die sekundäre Realisierung des Meters empfohlen und es wurden hierzu Richtlinien für drei verschiedene Anwendungen veröffentlicht.

Beiträge der Abteilung Fertigungsmesstechnik für die Bestimmung von N_A

Das beratende Komitee für die Masse in der Meterkonvention, CCM, hatte 2010 hohe Anforderungen an die Messunsicherheiten von Experimenten für die Neudefinition des Kilogramm gestellt, bevor die angestrebte Neudefinition in Kraft treten konnte, wobei mindestens ein Experiment eine Messunsicherheit von $2 \cdot 10^{-8}$ erreichen sollte. Die Experimente, die in den letzten Jahren zur Erreichung des oben genannten Ziels entwickelt wurden, sind die Kibble-Waage (Watt-Waage) und die XRCD-Methode (Avogadro-Projekt). Der Grundgedanke der X-Ray-Crystal Density (XRCD) Methode ist, die Anzahl von Atomen in einem einkristallinen Körper sehr genau zu bestimmen („zählen“) und unter Kenntnis der atomaren Masse auf die Masse des makroskopischen Körpers zu schließen, z. B. einer präzise gefertigten Kugel aus einkristallinem Silizium. Allerdings ist hierfür die genaue Kenntnis des Wertes der Avogadro-Konstanten erforderlich (Bild 1). Die XRCD-Methode wurde durch das ‚International Avogadro Cooperation (IAC)‘ Projekt

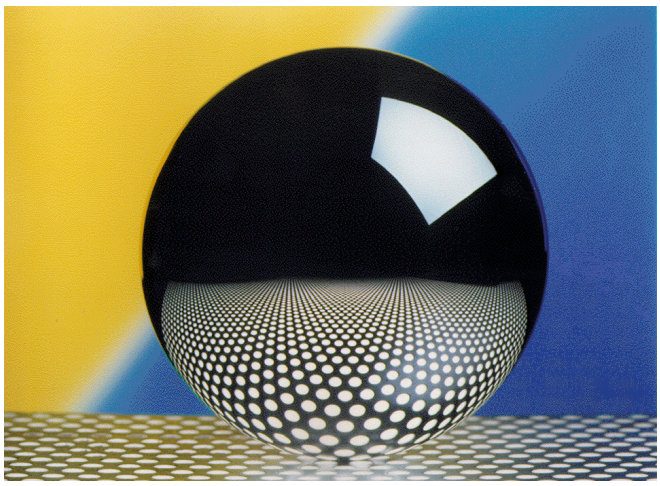


Bild 1: Einkristalline Si-Kugel und Zusammenhang von Avogadro-Konstante N_A und Volumen V, Molmasse M, Masse m und Gitterkonstante d_{220} der Si-Kugel: $N_A = (V \cdot M) / (m \cdot 8^{1/2} \cdot d^3_{220})$

in den letzten Jahren mit dem Ziel verfolgt, den Wert der Avogadro-Konstanten auf besser als $2 \cdot 10^{-8}$ zu bestimmen. Die 2017 publizierten Ergebnisse des IAC-Projektes an Silizium-Kugeln, die für die Revision des SI-Systems verwendet wurden, weisen eine relative Standardunsicherheit von $1{,}2 \cdot 10^{-8}$ für N_A auf (Metrologia **54** (2017) 693 –715).

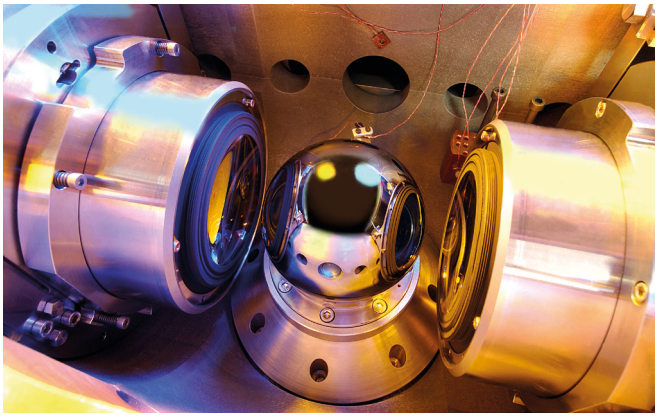
Als Material wurde im Avogadro-Projekt Silizium verwendet, da es durch die Anwendung im Halbleiterbereich mit guter Reinheit und in einkristalliner Form verfügbar war. Es stellte sich heraus, dass zur Bestimmung der molaren Masse des Si-Materials mit der erforderlichen Unsicherheit die Verwendung von isotopenangereichertem Silizium (^{28}Si) erforderlich war, da natürliches Silizium aus den drei Isotopen ^{28}Si, ^{29}Si und ^{30}Si besteht. Die Herstellung des isotopenangereicherten ^{28}Si-Materials erfolgte durch Partner-Institute in Russland, das Ziehen des ^{28}Si-Polykristalls als Einkristall im Institut für Kristallzüchtung in Berlin.

Anschließend wurden in der PTB aus den Si-Kristallen in einer komplexen Fertigungskette Si-Kugeln mit ca. 93 mm Durchmesser und ca. 1 kg Masse sowie sehr guten Oberflächen-Eigenschaften präpariert, siehe Bild 2: Rauheit Ra < 0,2 nm, Formabweichung < 30 nm, homogene Oxidschicht von ca. 1 nm bis 2 nm Dicke, keine Oberflächen-Kontamination, kein *sub*-surface damage. Die besondere Herausforderung an die Fertigungskette der Silizium-Kugeln war dabei die sichere Erreichung *aller* oben genannten Ziele.

Die einzelnen Schritte der Bearbeitung (Bild 2, links) bestehen aus a) der Bearbeitung des Silizium-Rohlings mittels Diamantbohren, b) dem Drehen des Kugel-Rohlings bis zu einer resultierenden Formabweichung von unter 1 mm, c) dem Läppen der Silizium-Kugel mit verschiedenen Korngrößen aus Siliziumkarbid (105 µm bis 45 µm) und Aluminiumoxid (25 µm bis 1 µm) und Läppwerkzeugen aus Metall für größeres und aus Glas für kleineres Korn (Bild 2 rechts). Dabei muss jeder Läppschritt die Schädigungen des vorherigen Schrittes im oberflächennahen Bereich der Silizium-Kugel vollständig beseitigen. Hierzu wurde die jeweils abzutragende Schichtdicke so gewählt, dass sie etwa dem 5 bis 10-fachen der im vorherigen Bearbeitungsschritt verwendeten Korngröße entsprach. Nach dem Feinläppen ist die resultierende Formabweichung der matten Silizium-Kugel ca. 100 nm. Für die abschließenden Polierschritte wird, bezogen auf den Radius der Siliziumkugel, eine Reserve von einigen Mikrometern vorgehalten, um die angestrebte Masse der Kugel zu erzielen. Wie die vorherigen Läppprozesse erfolgen auch die Polierprozesse in der in Bild 2 rechts gezeigten tetraedrischen Anordnung der Werkzeuge. Für die Polierschritte werden Kalotten mit Pech verwendet, als Poliermedium wird zu Beginn kolloidales Aluminiumoxid und bei den finalen Bearbeitungsschritten kolloidales Titandioxid eingesetzt, wobei der Prozess so geführt wird, dass sehr geringe Abtragungsraten von ca. 1 nm pro Minute eingestellt werden und so Temperaturerhöhungen durch die Bearbeitung so gering wie möglich gehalten werden können.

Für die Kontrolle der Rundheitsabweichungen während der Bearbeitung der Silizium-Kugeln wurde ein berührungslos messendes Formmessgerät eingesetzt, zudem erfolgte eine Kontrolle der Durchmesservariationen über einen Kugeläquator mit einem interferometrischen Messgerät. Die mit diesem Bearbeitungsprozess realisierte geringste Formabweichung an einer Silizium-Kugel betrug 16 nm.

Bild 2: Übersicht über die komplexe Fertigungskette für die Si-Kugelbearbeitung (links), tetraedrische Anordnung der Werkzeuge zum Schleifen, Läppen und Polieren der Kugeln (rechts).



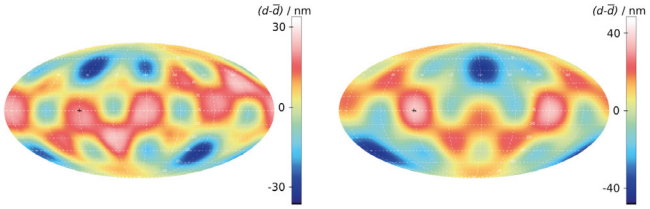


Bild 3: Kugelinterferometer (links) sowie Darstellung der hiermit bestimmten Variationen der Durchmesser an zwei ^{28}Si Kugeln in Mollweide-Projektion: 28Sikg01a (mitte, Δd = 58 nm) und 28Sikg01b (rechts, Δd = 84 nm). Mit Δd ist jeweils die Differenz von maximalem und minimalem Durchmesser angegeben.

Die in der PTB entwickelte komplexe Fertigungskette für die Si-Kugelbearbeitung wurde im Rahmen eines TransMet-Projektes in die Industrie transferiert. Diese Arbeiten wurden von der Industrie- und Handelskammer Braunschweig mit dem IHK-Technologietransferpreis 2019 ausgezeichnet.

Die Charakterisierung der Topographie der Schichtdicke der Siliziumoxidschicht an der Oberfläche der Siliziumkugeln erfolgte mit einem spektroskopischen Ellipsometer im Reinraumzentrum der PTB, abgestützt auf Bestimmungen der Schickdicke an wenigen Referenzpunkten auf der Kugel mittels Röntgenreflektometrie mit Synchrotronstrahlung.

Die Messung der Durchmesser der Si-Kugel und das daraus abgeleitete Volumen erfolgte in einem sphärischen Fizeau-Interferometer. Bild 3 zeigt ein Foto des Interferometers sowie hiermit bestimmte Durchmessertopografien an zwei ^{28}Si-Kugeln.

Die Anforderungen an die Volumenmessungen der Siliziumkugeln waren besonders herausfordernd und es konnte eine Messunsicherheit für das Kugelvolumen von $7 \cdot 10^{-9}$ bzw. für den mittleren Durchmesser von relativ $2{,}35 \cdot 10^{-9}$ bzw. absolut 0,22 nm bei einem Kugeldurchmesser von ca. 93,7 mm erreicht werden. Zur Erzielung dieser geringen Messunsicherheiten sind verschiedene Aspekte zu berücksichtigen, wobei die Erfassung des Einflusses der optischen Aberrationen im Interferometer und deren Simulation sowie der temperaturbedingte Einfluss auf den Durchmesser der Siliziumkugel aufgrund des relativ hohen thermischen Ausdehnungskoeffizienten von Silizium ($\alpha = 2{,}5 \cdot 10^{6}\ \mathrm{K}^{-1}$) besonders zu nennen sind. Um die Temperatur während der Messungen auf nahezu exakt 20 °C zu stabilisieren, ist das gesamte Gehäuse des Interferometers auf Millikelvin-Niveau thermostatisiert. Wärmeeinträge in das Experiment, z. B. durch den Mechanismus zum Anheben und zum Drehen der Kugel in verschiedenen Orientierungen waren deshalb durch konstruktive Maßnahmen am Kugelinterferometer so gering wie möglich zu halten.

Für die Bestimmung der Gitterkonstante des ^{28}Si-Kristalls wurde in der PTB ein Röntgeninterferometer aus dem Silizium-Material gefertigt. Mit dem Röntgeninterferometer lassen sich kleinste Verschiebungen der beweglichen Silizium-Lamelle mit hoher Auflösung messen, wobei die Röntgeninterferenzen eine Periodizität mit der kristallinen Gitterkonstante aufweisen. Für den Anschluss an die SI-Längendefinition wird zusätzlich ein in der PTB entwickeltes, spezielles optisches Interferometer verwendet, welches die Verschiebungen der beweglichen Lamelle des Röntgeninterferometers ebenfalls misst. Restliche Nichtlinearitäten des optischen Interferometers können dabei mit dem Röntgeninterferometer bestimmt und kompensiert werden.

Beiträge der Abteilung Fertigungsmesstechnik für die Bestimmung von *k*

Die Boltzmann-Konstante k ist in der Thermodynamik die Proportionalitätskonstante zwischen der Temperatur und der Energie eines thermodynamischen Systems, wie z. B. eines idealen Gases ($E = 3/2 \quad k \cdot T$). Für eine materialunabhängige, auf Naturkonstanten basierende Definition der Temperaturskala bietet sich damit die Festlegung eines numerischen Wertes für die Boltzmann-Konstante an. In Analogie zum Vorgehen bei der Neudefinition

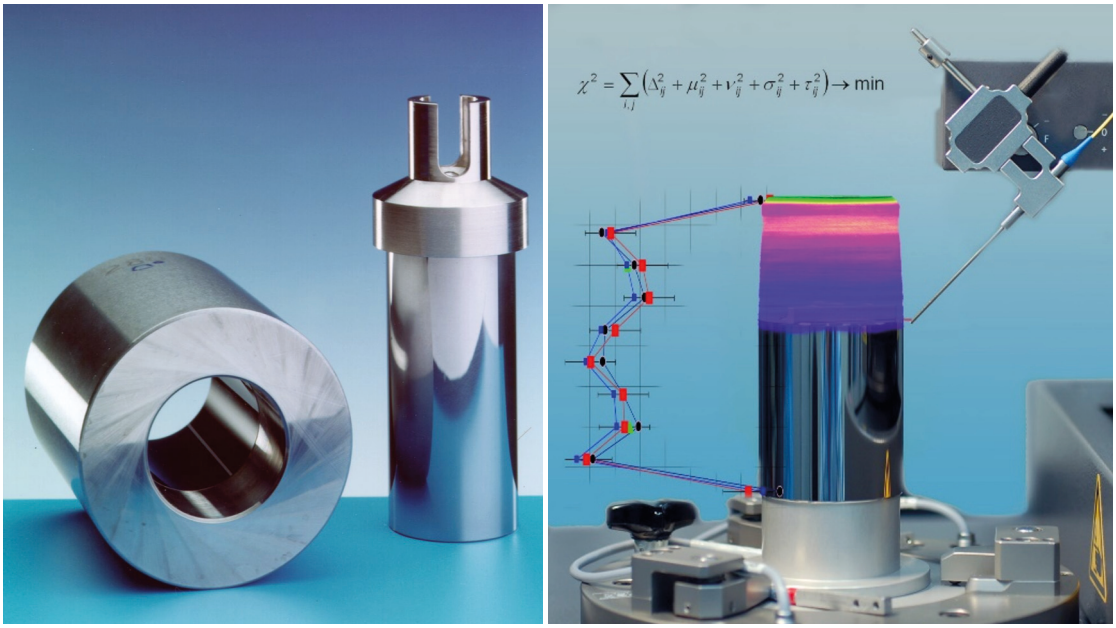


Bild 4: Foto eines Kolben-Zylinder Drucknormals (links) und Prinzipdarstellung der Verarbeitung von Durchmesser- und Formmessergebnissen mittels Datenfusion (rechts)

der SI-Einheit der Masse wurden von den Experten des beratenden Komitees für die Temperatur des CIPM, CCT, Zielsetzungen für die Unsicherheiten von Messergebnissen und Methoden zur Bestimmung der Boltzmann-Konstanten formuliert: Es sollten unterschiedliche Methoden zum Einsatz kommen und die angestrebte Unsicherheit für die Bestimmung von k sollte im Bereich von $1 \cdot 10^6$ liegen. Als Methoden mit dem größten Potenzial zur Erreichung geringer Unsicherheiten wurden Methoden der Gasthermometrie, wie die akustische Gasthermometrie (AGT) und die Dielektrizitätskonstanten-Gasthermometrie (DCGT) angeführt, ergänzt durch Methoden der elektrischen Rauschthermometrie (JNT, Johnson Noise Thermometry). Sowohl bei der AGT-Methode als auch bei DCGT-Methode spielen Präzisionsfertigung und dimensionelle Messmethoden wiederum eine wichtige Rolle.

Bei der in der PTB verfolgten DCGT-Methode zur Bestimmung der Boltzmann-Konstante wird die Dielektrizitätskonstante des Edelgases Helium bei unterschiedlichen Gasdrücken und konstanter Temperatur bestimmt. Für die Druckmessung wurden hierbei Kolben-Zylinder-Paare verwendet, deren Maß- und Formparameter mit geringer Unsicherheit kalibriert wurden, siehe Bild 4. Die im Rahmen des Boltzmann-Projektes erzielten Standard-Messunsicherheiten an den dort verwendeten Kolben-Zylinder Druckwaagen aus Hartmetall mit 20 cm² effektiver Querschnittsfläche zur Darstellung von 0,7 MPa betrugen für die Durchmesser 8 nm für den Kolben und 16 nm für den Zylinder. Auch in diesem Fall waren die Anforderungen an eine rückgeführte Temperaturmetrologie sowie die Temperaturstabilität während der Durchmessermessungen sehr groß. Dabei wurden unabhängig voneinander und auf verschiedenen Messgeräten zum einen die Durchmesser mit einem Längenkomparator präzise bestimmt und zum anderen die Geradheits- und Rundheitsabweichungen der zylindrischen Normale mit einem Formmessgerät gemessen, bevor diese Messergebnisse anschließend mit Methoden der Datenfusion zu 3D-Koordinaten weiterverarbeitet wurden. Die 2017 erreichten Messunsicherheiten der DCGT-Methode für k betragen $1{,}9 \cdot 10^6$ (Metrologia **54** (2017) 280–289).

Mit dem neuen Komparator für Länge und Durchmesser (KOLD) der PTB wird die Bestimmung von Durchmesser und Formabweichungen zylindrischer Messobjekte mit einer gemeinsamen Aufspannung des Prüflings möglich sein. Der KOLD wird zurzeit abschließend hinsichtlich seiner messtechnischen Eigenschaften untersucht und wird anschließend für Präzisionskalibrierungen zylindrischer Messobjekte zur Verfügung stehen.

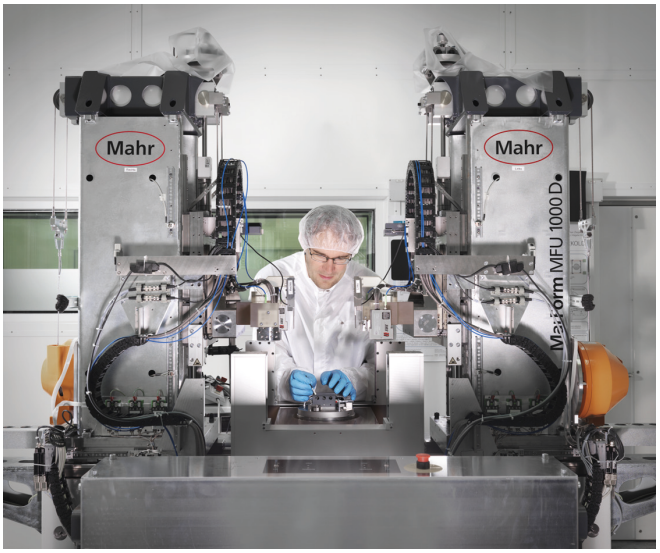


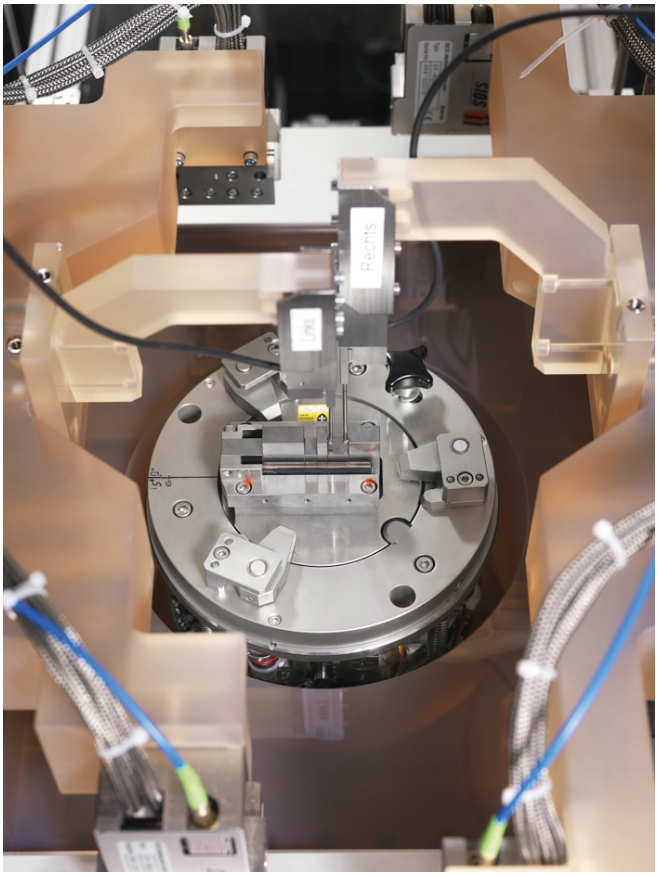
Bild 5: Der Komparator für Länge und Durchmesser (KOLD) der PTB: Gesamtansicht (links) und Detailansicht (rechts)

Die neue *mise en pratique* für den Meter

Im Rahmen der Revision des SI wurden auch die Anweisungen zur Darstellung und Weitergabe der Einheiten, die sogenannten *mise en pratique*-Dokumente, an die neuen Definitionen angepasst (siehe https://www.bipm.org/utils/en/pdf/si-mep/SI-App2-metre.pdf). Die Definition der Längeneinheit hat sich inhaltlich durch die Revision des SI nicht geändert, nur die Formulierung der Definition wurde an die ‚explicit constant'-Formulierung der anderen SI-Einheiten angepasst:

„The metre, symbol m, is the SI unit of length. It is defined by taking the fixed numerical value of the speed of light in vacuum c to be 299 792 458 when expressed in the unit m s^{-1}, where the second is defined in terms of the caesium frequency $\Delta\nu_{Cs}$." bzw. in deutscher Übersetzung „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."

Weiterhin heißt es in der SI-Broschüre: "This definition implies the exact relation c = 299 792 458 m s^{-1}. The effect of this definition is that one metre is the length of the path travelled by light in vacuum during a time interval with duration of 1/299 792 458 of a second", welches genau der bisherigen SI-Definition des Meters entspricht.



Die Definition der Längeneinheit bietet Flexibilität für die Realisierung von Längenmessungen für unterschiedliche Anwendungsbereiche. So werden Längenmessungen über größere Distanzen oftmals durch direkte Laufzeitmessungen von Licht durchgeführt, während im Fertigungs- und Labormaßstab interferometrische Methoden für genaueste Längenmessungen zum Einsatz kommen. Für die Erzielung geringer Messunsicherheiten für Längenmessungen werden vom beratenden Komitee für die Länge (CCL) regelmäßig Empfehlungen für den Einsatz von Frequenznormalen aktualisiert und veröffentlicht. Die Interferometrie, siehe Bild 6, ist letztlich eine indirekte Methode zur Messung von Laufzeitdifferenzen des Lichts und zur primären Darstellung der Länge nach SI-Definition geeignet.

In der praktischen Realisierung von Längenmessungen sind unterschiedliche Messunsicherheitseinflüsse zu beachten. Hierzu zählen bei Messungen an Luft der Einfluss der Luftparameter (Druck, Temperatur, Feuchte, …) auf die Wellenlänge des verwendeten Laserlichts, bei Längenmessungen auf der Nanoskala sind Einflüsse von optischen Nichtlinearitäten oftmals limitierend, bedingt durch die nichtidealen Eigen-

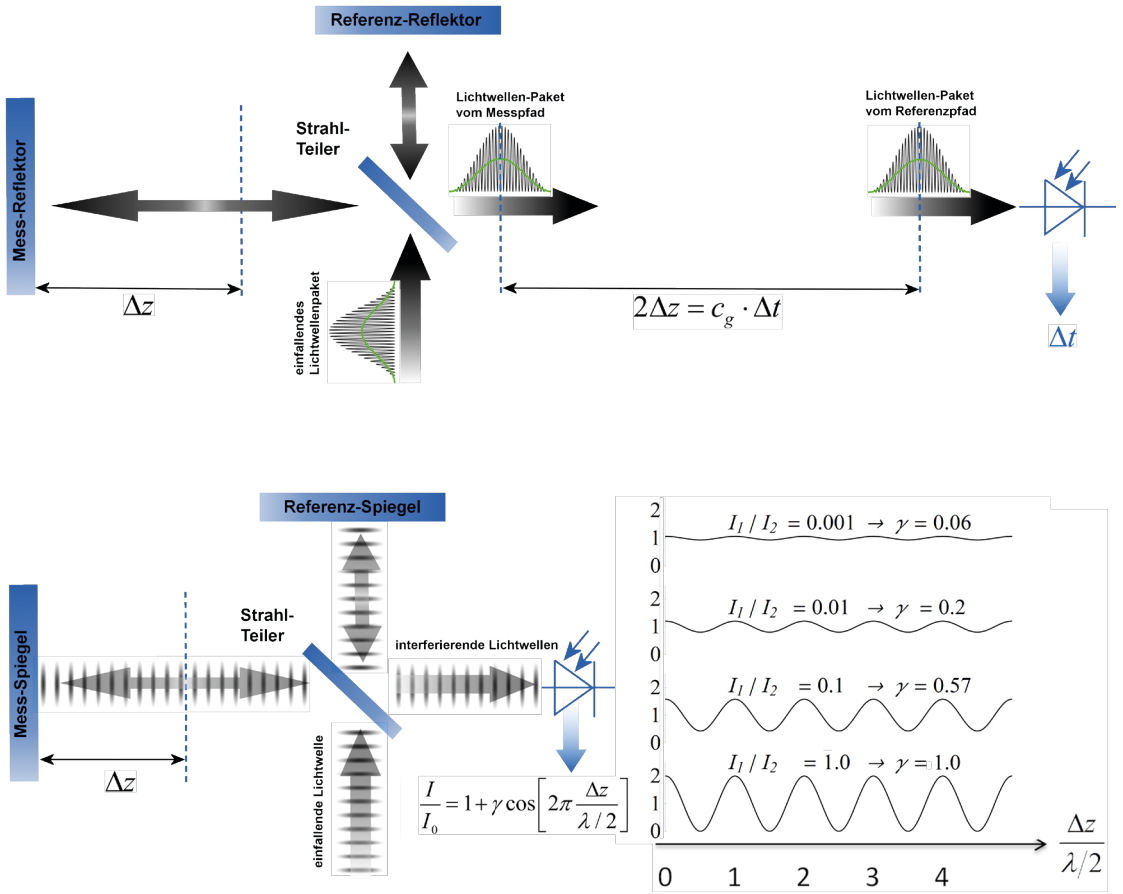


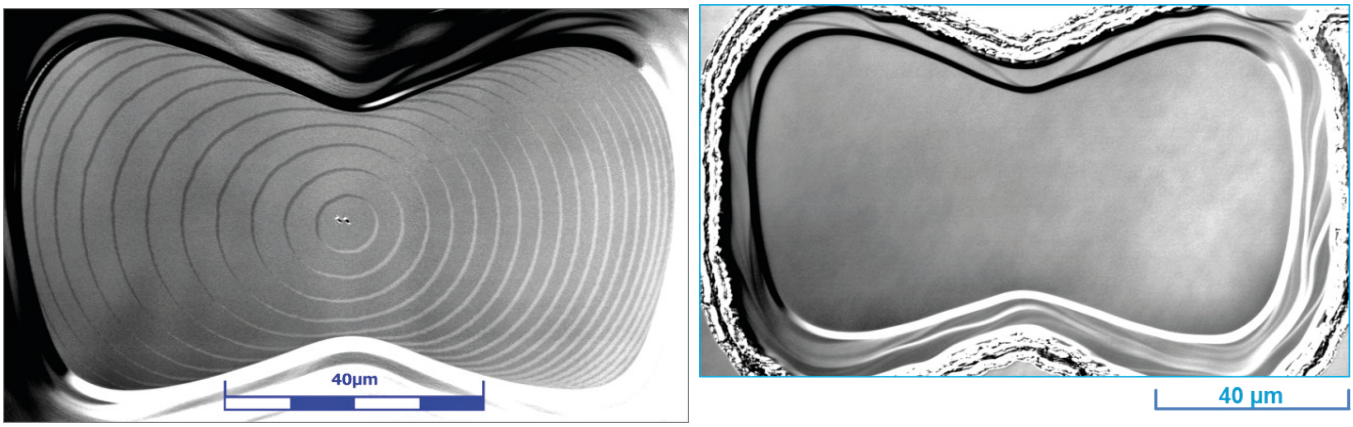
Bild 6: Prinzipdarstellung der Längenmessung mittels Bestimmung von Laufzeitunterschieden des Lichtes, zum einen direkt (oben), zum anderen mittels Interferometrie über Bestimmung der Interferenzphase (unten).

schaften optischer Komponenten von Interferometeraufbauten (z. B. Polarisationsübersprechen), welche in der neuen *mise en pratique* genannt sind.

Der Silizium-Gitterparameter als sekundäre Darstellung des Meters in der Nanometrologie

Metrologische Anwendung findet der Silizium-Kristallgitterparameter in der Nanometrologie, z. B. bei der Breitenmessung nanoskaliger Linienstrukturen für die Halbleiterindustrie oder in der Oberflächenmesstechnik bei der Messung von Stufenhöhen auf atomar glatten Oberflächen, siehe Bild 7. Die Bedeutung des einkristallinen Silizium-Gitters für die Nanometrologe wird in der neuen *mise en pratique* für den Meter in den Guidance Dokumenten CCL-GD-MeP-1 (Realization of the SI metre using silicon lattice parameter and x-ray interferometry for nanometre

Bild 7: Bilder atomarer Oberflächenstufen (links) sowie ausgedehnter atomar glatter Bereiche (rechts), aufgenommen mit einem konfokalen Laser-Scanning-Mikroskop



and sub-nanometre scale applications in dimensional nanometrology), CCL-GD-MeP-2 (Realization of SI metre using silicon lattice and Transmission Electron Microscopy for Dimensional Nanometrology) und CCL-GD-MeP-3 (Realization of SI metre using height of monoatomic steps of crystalline silicon surfaces) aufgegriffen, in denen das Silizium-Gitter für die sekundäre Darstellung des Meters für Messungen im nanoskaligen Bereich beschrieben wird. Die Präzisionsbestimmung des Silizium-Gitterparameters wurde durch das Avogadro-Projekt initiiert. Erst durch die dadurch gewonnenen Erkenntnisse ist das Silizium-Kristallgitter jetzt hinreichend gut charakterisiert, sodass es für die sekundäre Darstellung von Längen in der Nanometrologie für unterschiedliche Anwendungen eingesetzt werden kann.

In Schlagzeilen: Nachrichten aus der Abteilung

Grundlagen der Metrologie

Der Meter aus dem Kristall: alternativer Zugang zu Längenmessungen im Nanometerbereich
Im Zuge der Revision des SI-Einheitensystems, die am 20. Mai 2019 in Kraft trat, hat das beratende Komitee für die „Länge“ (CCL) der internationalen Meterkonvention vorgeschlagen, den Gitterparameter des Siliziumkristalls als Basis für die sekundäre Darstellung des Meters im Nanometerbereich zu nutzen. In der hochauflösenden Mikroskopie sind damit Pikometerunsicherheiten für Messungen von Stufenhöhen bis 10 nm erreichbar. (I. Busch, FB 5.1, ingo.busch@ptb.de)

FEM-Simulation von Einflussfaktoren auf die Nichtlinearität kapazitiver Wegsensoren
Mit Hilfe von FEM-Simulationen wurden die wichtigsten Einflussfaktoren auf die Nichtlinearität kapazitiver Wegsensoren identifiziert. Geometrische Faktoren, die Oberflächenrauheit sowie die lokale Verteilung von Oberflächenpotentialen können die Nichtlinearität der Wegmessung beeinflussen. Für die Validierung der Simulationen wurden kapazitive Sensoren mit unterschiedlichen Eigenschaften hergestellt und ein experimenteller Aufbau zur Messung der Nichtlinearität dieser Sensoren in Betrieb genommen. (L. Daul, FB 5.1, lars.daul@ptb.de)

Korrektur druckinduzierter optischer Weglängenänderungen in einer Refraktometerzelle
Der Betrieb einer Refraktometerzelle in einem Druckbereich jenseits der üblichen atmosphärischen Druckschwankungen ist erforderlich, wenn z. B. die Kompressibilität einer Maßverkörperung untersucht wird. Wegen damit einhergehender druckinduzierter optischer Weglängenänderungen wurde eine Korrektur hergeleitet, um diesen Störeffekt im Ergebnis zu berücksichtigen. Bei interferometrischen Längenmessungen an Endmaßen kann diese Korrektur bis zu einige Nanometer betragen. (G. Bartl, FB 5.4, guido.bartl@ptb.de)

Längenmetrologie für Satellitengeodäsie
Im Juni startete das EMPIR-Forschungsprojekt 18SIB01 ‚Large-scale dimensional measurements for geodesy – GeoMetre‘. In ihm sollen neuartige brechzahlkompensierende Längenmessmethoden in der Satellitengeodäsie erprobt werden. Ziel ist die Verbesserung der Rückführung des Internationalen Terrestrischen Referenzrahmens (ITRF) auf die SI Definition des Meters. ITRF wird z. B. zur Referenzierung global zusammenhängender Beobachtungen wie der Meeresspiegelhöhe verwendet. (F. Pollinger, FB 5.4, florian.pollinger@ptb.de)

Modern Interferometry for Length Metrology: Exploring Limits and Novel Techniques
Das Anfang 2019 im Verlag IOP (Institut of Physics) unter diesem Namen erschienene Buch entstand unter starker Beteiligung von PTB-Autoren. Ausgehend von der SI-Definition des Meters wird ein umfassender Überblick über verschiedenste etablierte und neue Messmethoden von Längen und Abständen mit Hilfe der Interferometrie gegeben: https://iopscience.iop.org/book/978-0-7503-1578-4. (R. Schödel, FB 5.4, rene.schoedel@ptb.de)

Einfluss parasitärer Lichtmoden auf interferometrische Längenmessungen
Als monochromatisch angenommene Lichtquellen spielen eine Schlüsselrolle bei der Darstellung von Längen mittels Interferometrie. Der Kalibrierwert der Frequenz der eingesetzten stabilisierten Laser bestimmt die Wellenlänge des Lichtes im Vakuum auf einem Niveau von relativ 10^{-12}. Im Rahmen der Inbetriebnahme eines neuen I_2-stabilisierten Nd:YAG-Lasers wurden bei Längenmessungen mittels Interferometrie jedoch Abweichungen von bis zu relativ 10^{-7} festgestellt. Als Ursache konnten letztlich parasitäre Lasermoden identifiziert werden, die durch einen nicht optimalen Arbeitspunkt des Lasers hervorgerufen wurden. (R. Schödel, FB 5.4, rene.schoedel@ptb.de)

Metrologielaser mit hoher Leistung und neuartiger Stabilisierung
Im EMPIR Forschungsprojekt GeoMetre wird ein neuartiges Stabilisierungsverfahren für Nd:YAG-Laser bei der Wellenlänge 532 nm und Ausgangsleistungen von bis zu 100 mW entwickelt. Die Frequenzstabilisierung des Festkörperlasers erfolgt über einen optischen Frequenzkamm. Durch den Einsatz von Faser-basierten Kopplern werden Anwendungen außerhalb des Laborumfelds ermöglicht. Ein Schlüsselelement bei dieser Entwicklung ist die FPGA-gestützte Signalverarbeitung, wodurch eine schmalbandige Filterung und somit ein erhöhtes Signal-Rauschverhältnis gewährleistet wird. (P. Köchert, FB 5.4. paul.koechert@ptb.det)

Übereinstimmung der beiden Kugelinterferometer der PTB besser als 1σ
Im Rahmen der Festlegung der definierenden Konstanten und als Beitrag zum ersten internationalen Ringvergleich für die kg-Realisierung ist die Zahl der zu messenden Silizium-Kugeln stark angestiegen. Gleichzeitig soll für die Erreichung der extrem kleinen Messunsicherheit eine Validierung der Ergebnisse erfolgen. Daher wurden zwei natürliche Silizium-Kugeln in den beiden Kugelinterferometern gemessen - die Übereinstimmung der entsprechenden Volumina lag jeweils unter $6 \cdot 10^{-9}$. Auf dieser Basis wurden im Kugelinterferometer 2 erste Messungen an ^{28}Si-Kugeln begonnen. (A. Nicolaus, FB 5.4, arnold.nicolaus@ptb.de, E. Kuhn, FB 5.4, eva.kuhn@ptb.de)

Metrologie für die Wirtschaft

Charakterisierung vertikaler Nanosäulen mit einer MEMS- basierten Nanobiege-Testplattform
Zur Messung der Biegesteifigkeit von Mikro- und Nanosäulen mit hohem Aspektverhältnis wurde ein MEMS-basiertes Rastersondenmikroskop entwickelt. Es verfügt über einen vertikalen Messbereich von 10 µm und ermöglicht die Messung von Kräften bis 100 µN. Erste experimentelle Untersuchungen zeigen, dass die Biegesteifigkeit von Nanosäulen mit einer Unsicherheit von 5 % bestimmt werden kann. (Z. Li, FB 5.1, zhi.li@ptb.de)

Charakterisierung der AFM-Cantileverspitzenform mit einem neuartigen Tastspitzenprüfnormal
Mit der zunehmenden Verwendung von Rasterkraftmikroskopen für die mechanische Charakterisierung von Nanomaterialien steigt der Bedarf, die Kontaktfläche der Spitze mit einer Messunsicherheit im Nanometerbereich zu bestimmen. Ein neuartiges Tastspitzenprüfnormal mit rechteckförmigen Rillen und Kantenradien im nm-Bereich wurde nun erstmals zur Bestimmung der AFM-Spitzenform verwendet. Die Messungen zeigen, dass die 3D-Spitzenform einer AFM-Diamantspitze erfolgreich bestimmt werden kann. (M. Xu, FB 5.1, min.xu@ptb.de)

UHV-STM für die Charakterisierung von Präzisionsnormalen für den Nanometerbereich
Zur Präzisionsmessung neuer kristalliner Kalibriernormale für den Nanometerbereich wurde in der PTB ein kommerzielles Rastertunnelmikroskop (STM) im Ultrahochvakuum mit einer interferometrischen Positionsmessung aller drei Messachsen ausgestattet. Ziel ist es, eine Messunsicherheit von 10 pm für die Positionsmessungen zu erreichen. (J. Ostermann, FB 5.1, johannes.ostermann@ptb.de)

Nationaler Ringvergleich zur Bestimmung von Rauheitskenngrößen an Raunormalen und Tiefeneinstellnormalen
Ein DKD-Ringvergleich zur Bestimmung von Rauheitskenngrößen an Raunormalen und Tiefeneinstellnormalen sowie der verwendeten Auswertesoftware zwischen DAkkS akkreditierten Laboratorien und der PTB wurde erfolgreich durchgeführt. Alle akkreditierten Laboratorien konnten ihre Kompetenz im akkreditierten und teilweise auch im nichtakkreditierten Servicebereich nachweisen. (L. Jung-Albrecht, FB 5.1, lena.jung-albrecht@ptb.de)

Referenzmetrologie für flächenhaft-messende Oberflächenmessgeräte ausgezeichnet mit „Best Paper Award“
Das Metrologische AFM mit erweitertem Messbereich (Met. LR-AFM) wurde für die Referenzmetrologie für quantitativ flächenhaft-messende Oberflächenmessgeräte weiter ausgebaut. Die Anwendung umfasst die Kalibrierung von Normalen der ISO 25178-Reihe sowie die Entwicklung eines neuartigen kreisförmigen Chirp-Normals. Die Präsentation des Fortschritts der Arbeiten, unter anderem charakterisiert durch einen reduzierten Rauschpegel von 0,13 nm und einer erhöhter Messgeschwindigkeit von 1 mm/s, wurde mit dem „Best Paper Award“ des Internationalen Symposiums für Messtechnik und Intelligente Instrumente (ISMTII) 2019 ausgezeichnet. (G. Dai, FB 5.2 gaoliang.dai@ptb.de)

Ausführliche Untersuchungen der Messmöglichkeiten eines hochgenauen Koordinatenmessgerätes
Seit Inbetriebnahme eines hochgenauen Koordinatenmessgerätes wurden zahlreiche Vergleichsmessungen zur Beurteilung der erreichbaren Messunsicherheit durchgeführt. In Kooperation mit dem Messgerätehersteller erfolgten dabei Untersuchungen an ein- und zweidimensionalen Normalen, wie z. B. Parallel- und Stufenendmaßen sowie Kugel- und Lochplatten. Die Arbeiten tragen dazu bei, die Kalibrierunsicherheit zur Weitergabe der Längeneinheit in die Industrie zu reduzieren. (M. Neugebauer, FB 5.3, michael.neugebauer@ptb.de)

Erste Begutachtungen bei Anwendern des überarbeiteten virtuellen Koordinatenmessgerätes VCMM
Das virtuelle Koordinatenmessgerät VCMM ist ein Software-Werkzeug zur Bestimmung der aufgabenspezifischen Messunsicherheit mittels Monte-Carlo Simulationen. Nach einer umfangreichen Überarbeitung und Verifikation der Modelle des VCMM fanden die ersten Begutachtungen bei DAkkS-akkreditierten Laboren statt, die das VCMM im Kalibrierbetrieb anwenden. In der Vorbereitung dazu wurden die Begutachter durch die PTB mit den Details dieses digitalen Zwillings eines Koordinatenmessgerätes vertraut gemacht. (D. Heißelmann, FB 5.3, daniel.heisselmann@ptb.de)

Ein neues röntgenbasiertes Verfahren zur schnellen Messung ausgewählter dimensioneller Messgrößen
Für die dimensionelle Qualitätskontrolle mit industrieller Computertomographie (CT) werden sowohl eine kurze Messdauer als auch ausreichend geringe Messabweichungen gefordert. In Kooperation mit dem Anlagenhersteller YXLON GmbH wurde ein neues Messverfahren entwickelt, das weniger Röntgenprojektionen benötigt als eine durchschnittliche CT-Aufnahme und keine tomographische Rekonstruktion enthält. Somit können die Messzeiten signifikant reduziert und die durch die Fehler in der Rekonstruktion auftretenden Messabweichungen minimiert werden. (O. Kazankova, FB 5.3, olga.kazankova@ptb.de, U. Neuschaefer-Rube, FB 5.3, ulrich.neuschaefer-rube@ptb.de)

Qualitätskontrolle von additiv gefertigten medizinischen Produkten mit industrieller Computertomographie
Die Medizin setzt große Hoffnungen in Implantate und Hilfsmittel, die für jeden individuellen Patienten spezifisch angefertigt werden. Sie können mit additiven Fertigungsmethoden (3D-Druck) produziert werden, und das in fast beliebig komplexen Formen. Vor ihrem breiten Einsatz fordern die Medizinbranche und Zertifizierungsstellen den Nachweis gleichbleibend hoher Qualität. Im Rahmen des europäischen Projekts MetAMMI wurden Grundlagen für die Qualitätskontrolle additiv hergestellter medizinischer Implantate und Hilfsmittel geschaffen. (F. Borges de Oliveira, FB 5.3, fabricio.borges@ptb.de, U. Neuschaefer-Rube, FB 5.3, ulrich.neuschaefer-rube@ptb.de)

Integration eines „Absolute Multiline Systems“ in Groß-Koordinatenmessgerät
In das Groß-Koordinatenmessgerät (Groß-KMG) im Kompetenzzentrum „WIND“ (CCW) wurde ein „Absolute Multiline System“ im Rahmen eines durch das BMWi geförderten Projekts integriert. Das kommerzielle System erlaubt die präzise absolute Längenmessung von Strecken über mehrere Meter mittels eines über Glasfaser eingekoppelten Laserstrahls und eines Reflektors. Die Laserquelle mit mehreren Messkanälen steht dabei im Rechenzentrum der PTB und nutzt zur Verteilung der Messsignale an verschiedene Messplätze die vorhandene Glasfaserinfrastruktur. Am Groß-KMG soll mit 20 Messlinien die Maschinengeometrie in regelmäßigen Abständen automatisiert überwacht werden. (N. Koppert, FB 5.3, nils.koppert@ptb.de, E. K. Rafeld, FB 5.3, eva.k.rafeld@ptb.de, M. Franke, FB 5.3, matthias.franke@ptb.de)

Technologie-Transfer der Kugelfertigung in die Industrie
Im Rahmen des Avogadro-Projektes wurde eine aufwändige Fertigungskette entwickelt, mit der die Silizium-Kugeln zur Neudefinition des kg hergestellt werden konnten. Bislang ist die PTB die erste und weltweit einzige Institution, die Kugeln mit Formabweichungen unter 20 nm, Mittenrauwerten unter 0,3 nm, schädigungsfreier Oberfläche ohne Kontaminationen und einer sehr gleichmäßigen Oxidschicht herstellen kann. Kugeln aus natürlichem Silizium werden darüber hinaus auch als Massenormale verwendet. Die Methode zur Fertigung solcher Kugeln wurde erfolgreich in die deutsche Industrie transferiert. (R. Meeß, FB 5.5, rudolf.meess@ptb.de)

Materialprüfung zur Verifizierung mechanischer Eigenschaften von additiv gefertigten Bauteilen
Die Herstellung additiv gefertigter Werkstücke erweitert signifikant die Möglichkeiten des Wissenschaftlichen Gerätebaus, Kundenanforderungen an Design und Funktionsumfang umzusetzen. Das Laser-Pulverbettverfahren mit den Grundwerkstoffen Polyamid, Edelstahl, Aluminiumlegierung und Titanlegierung erlaubt u. a. die Integration von innenliegenden Strukturen wie Kühlkanälen, strömungsbeeinflussenden Strukturen (Diffusoren) oder Sensoren. (D. Hagedorn, FB 5.5, daniel.hagedorn@ptb.de)

Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Bundesallee 100
38116 Braunschweig

Abteilung 5 | Fertigungsmesstechnik

Sekretariat
Kimberly Smith-Rösler
Telefon: (0531) 592-5011
Telefax: (0531) 592-69-5011
E-Mail: kimberly.smith-roesler@ptb.de

https://www.ptb.de/cms/ptb/fachabteilungen/abt5.html

Stand: 4/2020

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.