

Ultrapräzises Koordinatenmessgerät für Mikroteile

Die aus der Uhrenindustrie hervorgegangenen Technologiezweige Mikromechanik, Mikrooptik und Mikrosystemtechnik sind für die Schweizer Industrie zu Schlüsseltechnologien geworden. Entsprechend dieser Entwicklung ist der Bedarf an dimensioneller Charakterisierung von Miniaturkomponenten gestiegen. In Zusammenarbeit mit Hochschul- und Industriepartnern aus dem In- und Ausland entwickelte METAS ein innovatives, hoch genaues Gerät zur dreidimensionalen mechanischen Vermessung von Kleinstteilen. Mit den dadurch geschaffenen Messmöglichkeiten können Unternehmen in der Mikrotechnik mit Messdienstleistungen auf höchstem Niveau bedient werden.

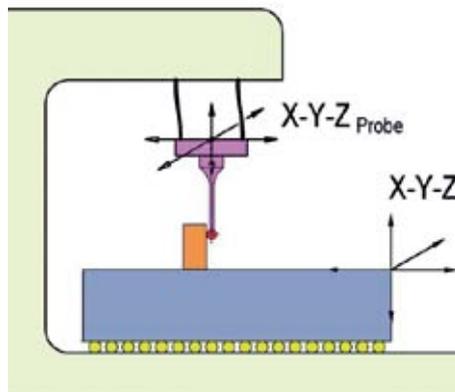
FELIX MELI, ALAIN KÜNG,
RUDOLF THALMANN

Moderne industrielle Erzeugnisse, die unser Leben heute wesentlich prägen, entwickeln sich wie nie zuvor: Sie werden schneller, billiger, haben eine erhöhte Speicherdichte oder mehr Funktionalität. Dieser Trend ist besonders ausgeprägt bei Computern, in der Telekommunikations- und Medizintechnik sowie bei Konsumgütern.

Neue Herausforderung für die Längenmesstechnik

Diese technologische Revolution bedingt eine stetige Miniaturisierung, die Integration komplexerer Systeme, neue Materialien und vor allem neue Fertigungstechnologien. Dabei spielen neben der Mikroelektronik auch die Mikromechanik, die Mikrooptik und die Mikrosystemtechnik eine entscheidende Rolle. Die drei zuletzt genannten Gebiete liegen in der Tradition der schweizerischen Präzisionstechnik und haben sich als Schlüsseltechnologien für den Forschungs- und Produktionsstandort Schweiz erwiesen.

Diese Entwicklung stellt auch die dimensionelle Messtechnik vor neue Herausforderungen: Die zu messenden Teile werden kleiner, ihre Geometrie komplexer und die reduzierten To-



1: Prinzip einer Koordinatenmessmaschine.

leranzen verlangen eine höhere Präzision. Hoch genaue Kleinstteile sind zwar in der Mikrotechnik nichts Neues – wir kennen sie in der Schweiz vor allem aus der Uhrenindustrie seit Jahrhunderten – doch das Zusammenspiel von Teilen verschiedener Hersteller und verschiedener Materialien sowie die Austauschbarkeit einzelner Komponenten stellen neue Anforderungen.

Um mit dieser technologischen Entwicklung Schritt zu halten, stellt METAS die dazu notwendigen Mess-



2: Mikro-Koordinatenmessgerät am METAS.

möglichkeiten bereit und kann so der Industrie und Forschung die notwendige Unterstützung bieten. In einem dreijährigen Projekt wurde am METAS eine einzigartige, ultrapräzise Mikro-Koordinatenmessmaschine für Kleinstteile aufgebaut.

Die Koordinatenmesstechnik

Koordinatenmessgeräte erfassen die dreidimensionale Geometrie von Werkstücken und sind somit die vielseitigsten Werkzeuge der Längenmesstechnik. Durch Antasten der Werkstück-

oberfläche mit einem genau bekannten Tastelement, üblicherweise einer Saphirkugel, wird die Position von einzelnen Oberflächenpunkten des Werkstücks gemessen. Aus Gruppen solcher Messpunkte werden die Parameter von geometrischen Elementen wie Linien, Kreisen, Ebenen, Zylindern, Kugeln, Kegeln usw. bestimmt, woraus sich auch die relative Lage dieser Geometrielemente berechnen lässt. Ausser Längen können somit auch Lagen, Formen und Winkel erfasst werden. Verglichen mit spezialisierten Messgeräten, die für eine einzelne Messgrösse konzipiert sind, muss für diese Vielseitigkeit allerdings oft eine erheblich geringere Genauigkeit in Kauf genommen werden.

Ein Koordinatenmessgerät besteht aus drei räumlichen Verfahrsachsen und einem Tastsystem. Durch Verschieben der Bewegungsachsen wird das Tastelement an vorgegebenen Punkten mit der Oberfläche des Objektes in Berührung gebracht. Sowohl die Verfahrsachsen als auch der Tastkopf sind mit einem Messsystem für alle drei Raumrichtungen versehen (Illustration 1). Das Resultat einer Antastung ist stets eine Kombination der gemessenen Koordinaten der Verfahrsachsen sowie der gemessenen Auslenkung des Tastelementes bei der Berührung. Beim Kombinieren der Messwerte ist die relative Lage der Koordinatensysteme des Tastkopfes und des Werkstückes bezüglich des Maschinensystems sowie der Tastkugelradius zu berücksichtigen.

Fortschritte in der Computer- und Steuerungstechnik ermöglichen es, auch komplexe Messaufgaben automatisch und effizient durchzuführen. Die Software berechnet aus den angestasteten Punktwolken nicht nur die Form und Lage von einfachen Regelgeometrien, sondern auch die Parameter von Gewinden oder Verzahnungen. Weiter entwickelte Programme sind sogar in der Lage, ein Koordinatenmessgerät im Scanningmodus zu steuern und Freiformflächen zu berechnen. Geometriefehler, die bei der Fertigung des Koordinatenmessgerätes, des Tastkopfes oder des Antast-

elementes entstanden sind, können heute vermessen und in Echtzeit numerisch korrigiert werden. Koordinatenmessgeräte haben sich daher in den letzten Jahren in der mechanischen Fertigung als vielseitiges und unentbehrliches Hilfsmittel immer mehr verbreitet.

Ultrapräzises Mikro-Koordinatenmessgerät am METAS

Um die Vorteile der Koordinatenmesstechnik auch für Mikroteile nutzen zu können, hat sich METAS für eine Neuentwicklung entschieden. Herkömmliche Koordinatenmessgeräte mit ihren relativ grossen Tastköpfen können im Prinzip zwar auch kleine Taster aufnehmen, die praktische Grenze dafür liegt jedoch bei einem Kugeldurchmesser von etwa 1 mm, wie später noch erläutert wird.

Die neue Messmaschine am METAS basiert auf zwei hochwertigen Komponenten. Einerseits auf einem neuen messenden Tastkopf mit sehr kleiner Tastkraft, den wir zusammen mit der EPF Lausanne und der Mecartex SA, Losone entwickelt hatten [1, 2], und andererseits auf einem ultraprazisen 3D-Verschiebetisch, der beim Zentrum für Produktionstechnologie (CFT) von Philips in Eindhoven, der Technologieschmiede von Philips, im Rahmen einer vierjährigen Doktorarbeit entstanden ist und wir erwerben konnten [3].

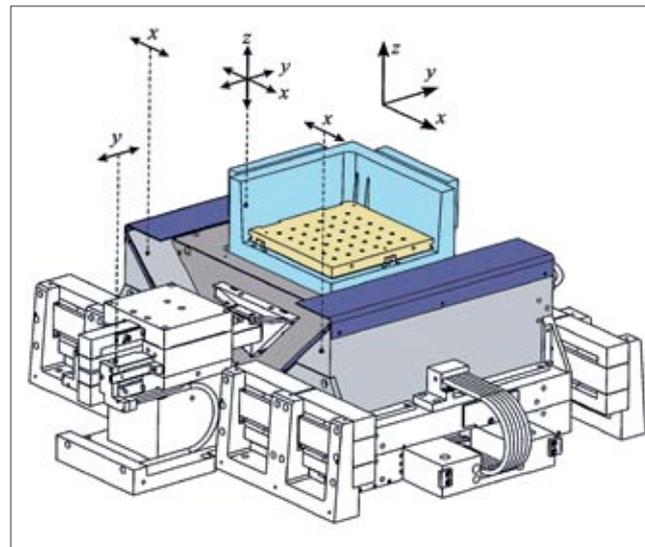
Diese Hauptkomponenten, kombiniert mit einer neuen Steuerung so wie unseren guten Laborbedingungen, führten zu einem bezüglich Genauigkeit einmaligen Mikro-Koordinatenmessgerät (Bild 2). Auf die einzelnen Bauelemente wird nun im Folgenden näher eingegangen.

3D-Verschiebetisch

Hauptbestandteil jeder Koordinatenmessmaschine ist ein numerisch gesteuerter dreiachsiger Verschiebetisch. Das Gerät von Philips CFT kann, dank

innovativer Konstruktion, alle wesentlichen Grundprinzipien der Metrologie und der Kinematik strikt einhalten. Die Führungen basieren auf Vakuum vorgespannten Luftlagern mit sehr kleinen Führungsfehlern von weniger als einer Bogensekunde für Nicken, Rollen und Gieren. Die spezielle Schlittenkonfiguration mit zwei Keilen für die z-Achse macht den Tisch besonders niedrig und daher schwingungsunempfindlich.

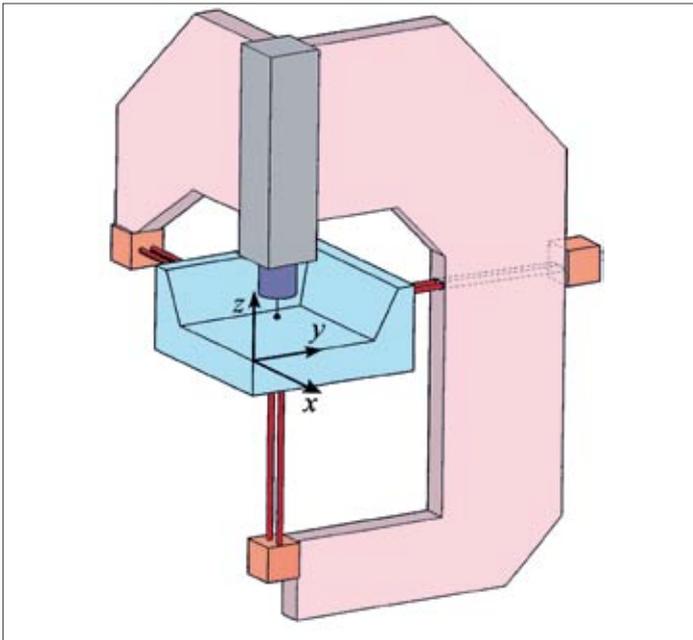
Angetrieben wird der Tisch mit Lorentz-Aktuatoren, also mit Tauchspulen, wobei die Position durch drei Laserinterferometer erfasst und durch einen Motion-Controller geregelt wird (Illustration 3). Damit die Verlustleistung des Antriebs möglichst klein bleibt, ist für die vertikale Achse eine pneumatische Gravitationskompensation eingebaut worden, die eine Gegenkraft aufbaut und regelt, die der Masse des Tisches und des Werkstückes entspricht.



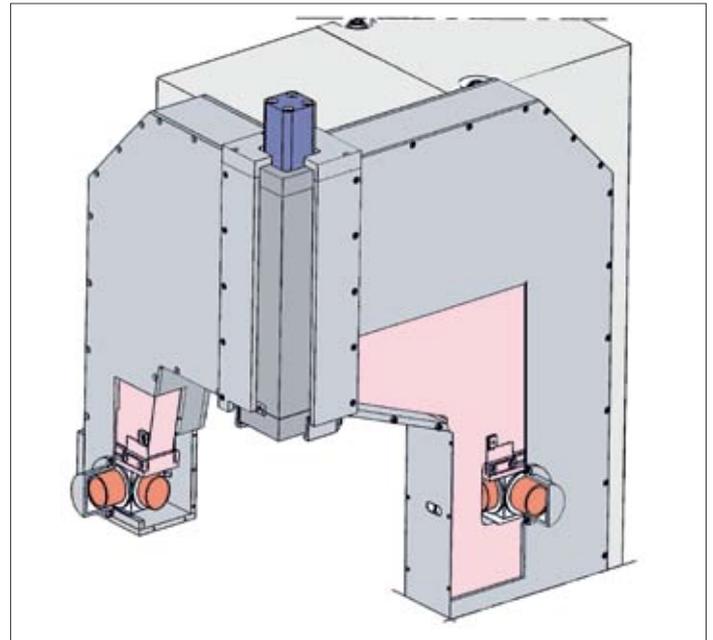
3: Dreidimensionaler Verschiebetisch mit Lorentz-Aktuatoren und Zerodur-Referenzspiegelkörper [3].

Damit bleibt die gesamte Verlustleistung aller Aktuatoren unter 0.5 W.

Das Arbeitsvolumen von 90 mm x 90 mm x 38 mm ist für Kleinteile ausreichend. Bei der Messung bewegt sich der Tisch mit dem Werkstück in allen drei Raumrichtungen, der Tastkopf steht still. Dies erlaubt eine sehr vorteilhafte Anordnung der Laserinterferometer unter Einhaltung des Abbe-Prinzips in allen drei Richtungen (Illustration 4). Das Werkstück liegt im Innern einer Würfecke aus einer Nullausdehnungsk Keramik (Zerodur). Die



4: Metrologierahmen mit Tastkopf und drei Laserinterferometern unter Einhaltung des Abbe-Prinzips [3].



5: Metrologierahmen mit Wärmeschutzgehäuse aus Aluminium [3].

äußeren Flächen sind verspiegelt und dienen als bewegliches Referenzkoordinatensystem für das Interferometer. Die Ebenheit der Spiegel sowie ihre Orthogonalität wurden durch ein Selbstkalibrierungsverfahren bestimmt und werden bei jeder Antastung berücksichtigt.

Metrologierahmen mit Wärmeschutzschild

Der Metrologierahmen verbindet die Interferometer mit dem Tastkopf und schliesst so den Messkreis (Illustration 4). Dieser Rahmen muss die relative Lage der Interferometer bezüglich dem Tastkopf während der ganzen Messzeit von manchmal mehr als einer Stunde auf wenige Nanometer konstant halten. Daher ist er kinematisch so befestigt, dass nur konstante, von der Position des Verschiebetisches unabhängige Kräfte auf ihn einwirken.

Obschon das Mikro-Koordinatenmessgerät in einem sehr gut klimatisierten Labor des METAS aufgebaut ist, bedarf es weiterer Massnahmen, um den Metrologierahmen vor Temperaturschwankungen zu schützen. Berücksichtigt man die Grösse dieser Struktur und die Anforderung, auch bei einer längeren Messzeit weniger als 10 nm Drift zu haben, muss ihre Temperaturkonstanz während der Messung besser

als 1 mK sein. Dies wird durch eine Messkabine mit infrarotundurchlässigen Scheiben rund um das Koordinatenmessgerät sowie einem Wärmeschutzschild aus dicken Aluminiumplatten erreicht (Illustration 5).

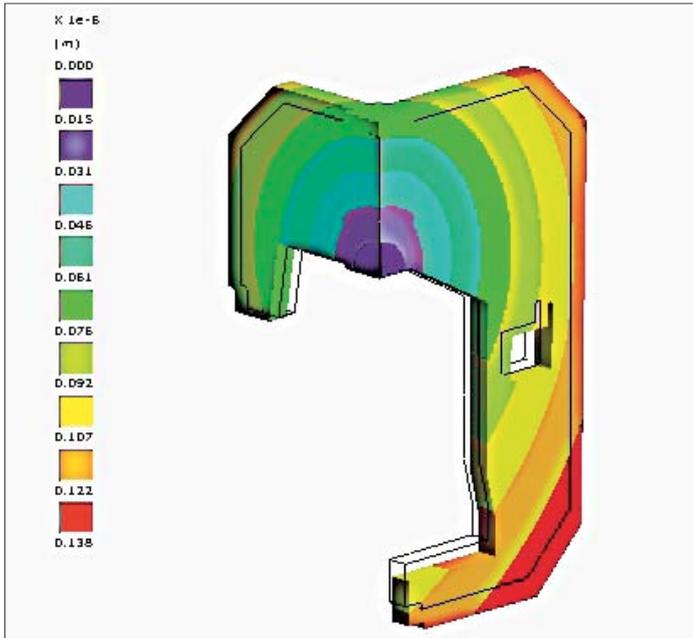
Kurzzeitige Temperaturschwankungen der Umgebung werden damit um einen Faktor 1000 gedämpft. Langfristige Temperaturschwankungen können rechnerisch korrigiert werden. Die gute Wärmeleitfähigkeit von Aluminium reduziert Temperaturgradienten innerhalb des Rahmens und macht sein Verhalten berechenbar. Dies wurde durch ein FEM-Modell (Modell mit finiten Elementen) verifiziert (Illustration 6). Die Daten von 16 Thermistoren, die in den Metrologierahmen eingelassen sind, werden verwendet, um eine lineare Korrektur zu berechnen.

Der Tastkopf

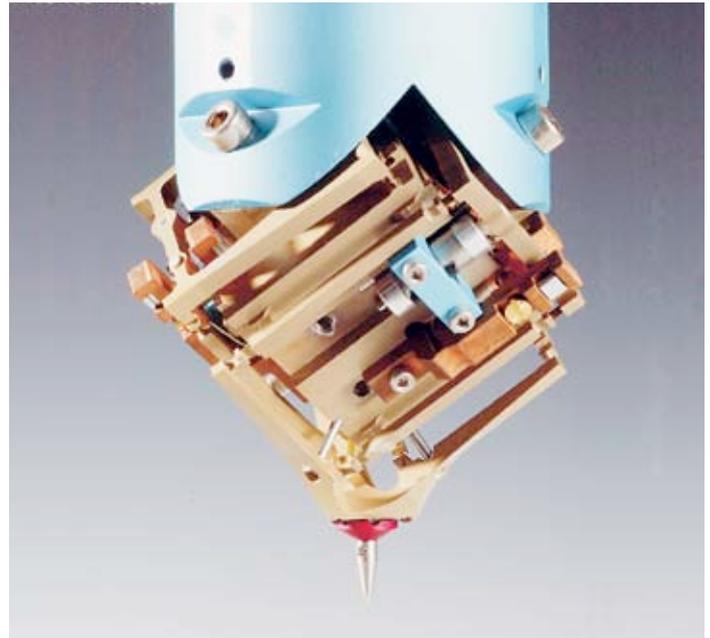
Bei allen Koordinatenmessgeräten ist der Tastkopf ein kritisches Element, und für Mikroteile ist bisher keine befriedigende Lösung gefunden worden. Wegen der schnellen, berührungslosen Antastung und dank Fortschritten in der Bildverarbeitung werden heute oft optische Tastsysteme eingesetzt. Bei Messungen von höchster Genauigkeit sind jedoch mechanische Taster nach wie vor unerreicht. Als Tastelemente dienen meistens Saphirkugeln, die mit

hoher Präzision, d. h. kleinen sphärischen Formabweichungen und mit Durchmessern von wenigen Zehntel Millimetern gefertigt werden können. Entscheidend bei der Verwendung kleiner Tastkugeln ist die bei der Antastung auftretende Kraft, die nicht nur zu elastischer, sondern auch zu plastischer Deformation der Oberfläche führen kann. Die maximal zulässige Tastkraft verringert sich bei kleineren Tastkugeln dramatisch, ist diese doch proportional zum Quadrat des Durchmessers. So beträgt beispielsweise die maximal zulässige Antastkraft, bevor plastische Deformation auftritt, für eine Saphirkugel mit 0.1 mm Durchmesser auf einer Stahloberfläche nur 1.5 mN, ein Wert, der etwa 100-mal tiefer liegt als dies bei herkömmlichen Tastköpfen der Fall ist.

Im Rahmen eines Top Nano 21-Forschungsprojektes hat METAS zusammen mit der EPF Lausanne und der Mecartex SA, Losone, eine neue Tastkopfstruktur entwickelt [1, 2]. Diese basiert auf Parallelogrammen und Festkörpergelenken, die der Tastkugel genau drei Freiheitsgrade erlauben. Die drei Rotationsfreiheitsgrade werden blockiert und die noch mögliche transversale Bewegung wird in ihre xyz-Komponenten zerlegt. Diese Struktur wird mit Drahterosion aus einem einzigen Stück Aluminium gefertigt (Bild 7).



6: FEM-Wärmedehnungsmodell des Metrologierahmens.



7: Kinematische Struktur des 3D-Tastkopfes.

Die drei transversalen Verschiebungen des Tasters werden durch induktive Wegaufnehmer gemessen. Beim gewählten Messweg von $\pm 200 \mu\text{m}$ liegt das Rauschen im Bereich von wenigen Nanometern. Eine unabhängig eingebaute mechanische Wegbegrenzung erlaubt eine maximale Tasterbewegung von $\pm 0,5 \text{ mm}$ in allen Richtungen und schützt so die kinematische Struktur vor Überbeanspruchung.

Wegen der geringen Steifigkeit der Festkörpergelenke bewirkt allein schon die Schwerkraft eine erhebliche Tasterauslenkung. Mit einem System von drei verstellbaren Permanentmagneten wird daher die Gravitationskraft kompensiert. Da der Tastkopfwürfel quasi auf einer seiner Ecken steht, sind die drei gemessenen Koordinaten bezüglich der Gravitation identisch und die Steifigkeit ist isotrop, d. h. die Tastkraft ist richtungsunabhängig. Allerdings bedingt die schiefe Lage des Tasterkoordinatensystems eine numerische oder elektronische Transformation in das Koordinatensystem der Bewegungsachsen bzw. in das Werkstückkoordinatensystem. Weiterführende Informationen zum Tastkopfprojekt finden sich in metINFO 1/2003 [2].

Software und Steuerung

Um ein optimales Zusammenspiel der Komponenten zu gewährleisten und

um die vollständige Kontrolle über alle Messverfahren und die notwendigen Korrekturen zu haben, wurden die ursprüngliche Steuerung sowie Teile der Elektronik der Philips-Maschine erneuert. Das in LabView implementierte Kontrollprogramm erfasst die Messwerte, steuert die Tischbewegung durch den Motion-Controller, überwacht die Sicherheit des Messgerätes und erlaubt die direkte Programmierung einfacher Messabläufe.

Von zentraler Bedeutung ist es, die drei Positionswerte der Interferometer synchron zu den Taster Signalen zu erfassen. Dies deshalb, weil die Restbewegung der Positionsregelung bei etwa 30 nm liegt. Ist der Taster in Kontakt mit der Oberfläche, misst der Kopf die gleiche Restbewegung. Die Signale sind korreliert und bei exakt synchroner Erfassung fällt der Anteil der Restbewegung weg.

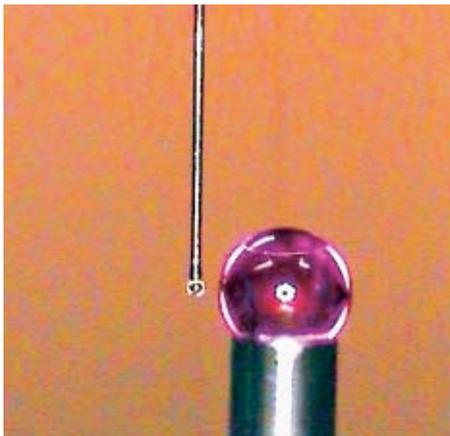
Bei jeder Antastung wird jeweils eine ganze Weg-Kraft-Kurve gemessen und auf einen Antastpunkt bei Messkraft Null extrapoliert. Dieser Antastpunkt wird weiter korrigiert bezüglich der Form- und Orthogonalitätsfehler der Referenzspiegel, der Lage des Tastkopfkoordinatensystems, der Formabweichung der Tastkugel, der Werkstücktemperatur, der Drift des Metrologierahmens sowie der Brechungsindex- und der Totwegänderung.

Ebenfalls im Kontrollprogramm implementiert ist eine Schnittstelle zu Quindos, einer kommerziellen Hochsprache für Koordinatenmessgeräte. Quindos läuft auf einem zweiten Rechner, der via LAN-Netzwerk mit dem Controller verbunden ist. Mit Hilfe von Quindos können auch komplizierte Messaufgaben effizient, normengeerecht und allenfalls kompatibel zu CAD-Daten des Anwenders gelöst werden. Zwei Videomikroskope und ein Joystick mit logarithmischer Empfindlichkeit erleichtern das manuelle Antasten der kleinen Objekte.

Die Tastkugel und ihre Kalibrierung

Dank der kleinen Tastkraft ist der Einsatz winziger Tastkugeln möglich. Der momentan kleinste verfügbare Taster hat eine Saphirkugel mit einem Durchmesser von nur $125 \mu\text{m}$ (Bild 8). Die Größe der 1 mm -Referenzkugel entspricht etwa der Größe eines kleinen Stecknadelkopfs. Die Tastkugel ist achtmal kleiner und sitzt am Ende eines 3 mm langen Schafts mit der Dicke eines Haars. Dieser Prototyp wurde uns freundlicherweise von der SWIP Saphirwerk Industrieproduktion AG, Brügg, zur Verfügung gestellt.

Noch kleinere Kugeln sind oft aus Glas; sie sind nicht sehr rund und haben nur eine geringe Härte. Durch



8: Mikrotaster mit 125 µm Durchmesser sowie 1 mm-Kalibrierkugel.

häufiges Antasten oder beim Scannen entstehen rasch lokale Abflachungen, welche die Messungen verfälschen. Die Verwendung von hartem Saphir ist daher entscheidend. Obwohl diese Kugeln äusserst präzise gefertigt sind, liegen die Rundheitsabweichungen im Bereich von 30 nm bis 120 nm. Wird das Werkstück nicht immer mit der gleichen Stelle der Tastkugel berührt, ergeben sich grössere Beiträge zur Messunsicherheit.

Unser Ziel war es, die Tastkugelform zu bestimmen und bei jeder Antastung richtungsabhängig zu korrigieren. Dies geschieht nun durch einen

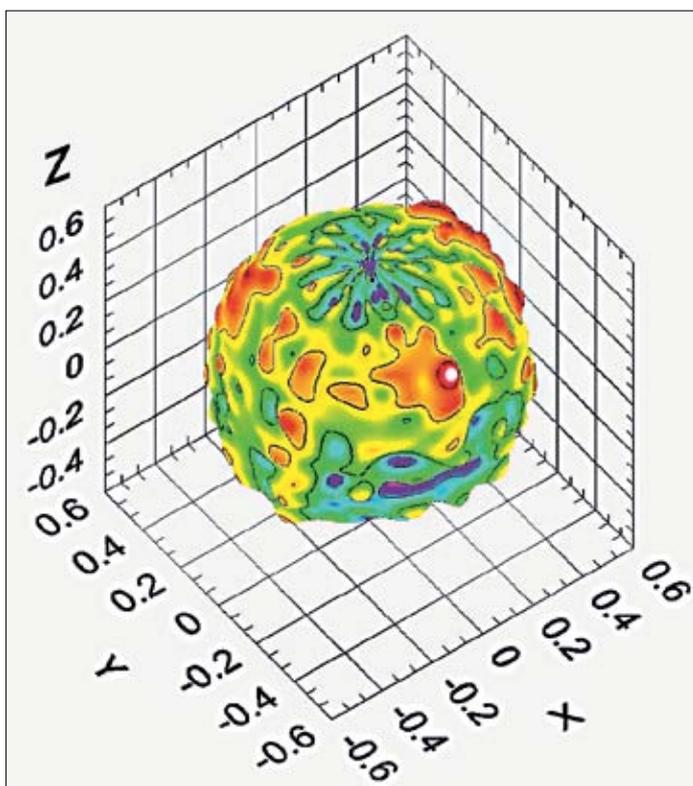
automatischen Kalibrierablauf auf einer bekannten Kalibrierkugel (Bild 8). Allerdings müssen dabei die Form sowie der absolute Durchmesser der Kalibrierkugel auf wenige Nanometer genau bekannt sein.

Weil solche Kugeln nicht verfügbar sind, haben wir ein neues Verfahren entwickelt, um Form und Durchmesser direkt auf der Mikro-Koordinatenmessmaschine zu bestimmen [5, 6]. Es ist nicht auf eine externe Massverkörperung angewiesen und führt den Durchmesser direkt auf die Interferometermessung zurück. Dabei werden drei 1 mm-Kalibrierkugeln gegenseitig in mehreren Lagen ausgemessen, wobei jeweils eine der Kugeln als Taster dient. Die in Illustration 9 gezeigte Kalibrierkugel hat einen Durchmesser von $(1.000\ 804 \pm 0.000\ 010)$ mm und eine Formabweichung von nur 40 nm ($R_{max} - R_{min}$).

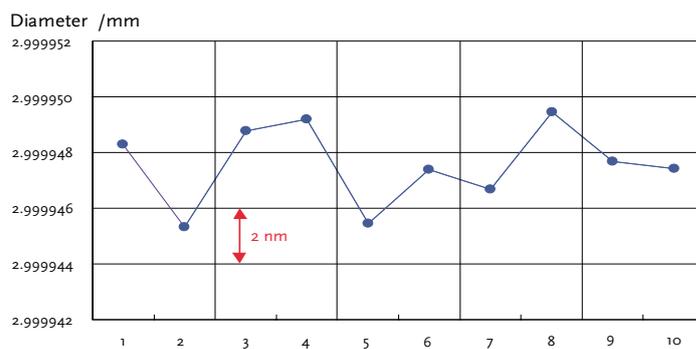
Demonstrationsmessungen und Anwendungen

Bereits die ersten mit der neuen Messmaschine durchgeführten Antastungen übertrafen unsere Erwartungen bei weitem. Die Wiederholbarkeit einer Einzelpunktantastung lag im Bereich

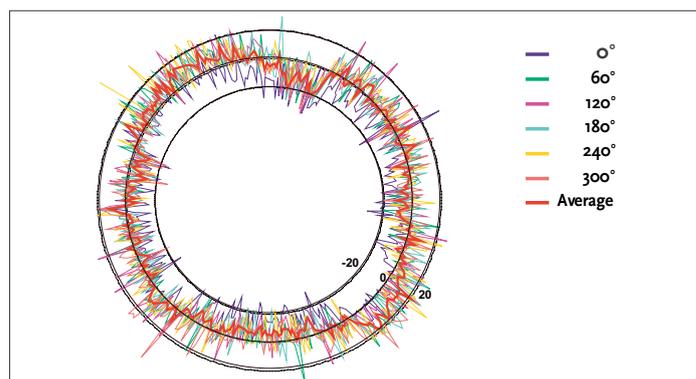
weniger Nanometer. Verschiedene Messungen an einfachen Geometrie-elementen dienten als erste Tests. So haben wir beispielsweise die Rundheit und den Durchmesser eines 3 mm-Kalibrierrings zehnmal mit je 36 Antastpunkten gemessen. Dabei zeigte sich keine Richtungsabhängigkeit in der Wiederholbarkeit. Die Standardabweichung der so bestimmten Durchmesser betrug nur 1.5 nm (Diagramm 10). Die mittlere Rundheit des Rings lag bei 94 nm. Bei dieser Messung wurde allerdings noch keine Formkorrektur der Tastkugel durchgeführt. Eine erste Rundheitsbestimmung am Äquator der Tastkugel wurde durch mehrfache Messung einer 0.5 mm-Saphirkugel in sechs verschiedenen Lagen sowie einem Fehlertrennverfahren bestimmt. Die so ermittelte Rundheit der 0.3 mm-Tastkugel war 40 nm (Diagramm 11). Bei tastenden Längenmessverfahren wird üblicherweise der Tastkugelradius an einem bekannten Normal, einer Kalibrierkugel oder einem Endmass, bestimmt. Die erzielbare Genauigkeit ist daher nie besser als die des verwendeten Normals. Für das Mikro-Koordinatenmessgerät würde dies eine grosse Einschränkung bedeuten.



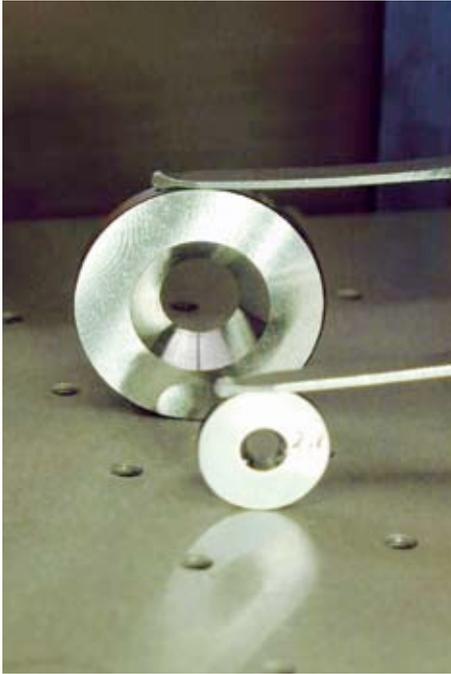
9: Sphärizität einer 1 mm-Kalibrierkugel mit stark überhöhter Formabweichung von 40 nm.



10: Wiederholbarkeit bei der Durchmesserbestimmung an einem 3 mm-Lehrring.



11: Rundheit der Tastkugel nach Fehlertrennung: $(R_{max} - R_{min}) = 40$ nm.

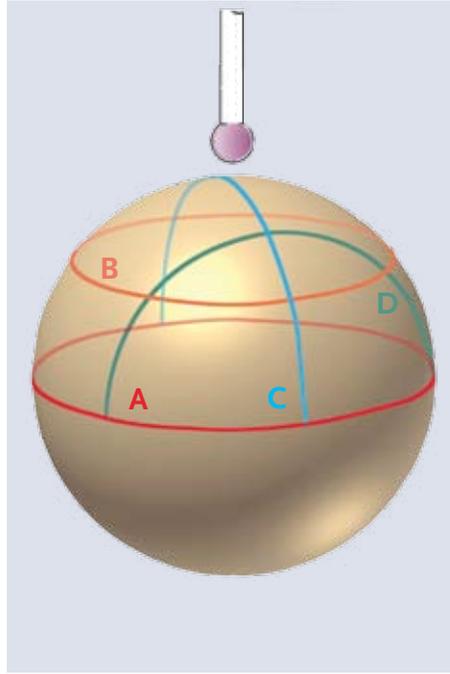


12: Photometerblenden.

Andererseits kann durch eine Vergleichsmessung auf einem Endmass das Funktionieren des Koordinatenmessgerätes sowie das oben vorgestellte unabhängige Tastkugelkalibrierverfahren getestet werden. Messungen an interferometrisch kalibrierten 6 mm-Stahl- und Hartmetall-Endmassen ergaben eine Übereinstimmung innerhalb der Messunsicherheit von 20 nm (U_{95}).

Die Norm ISO 10360-2 definiert einen Test, der die maximale Antastabweichung P ermittelt. Dazu wurde eine 1 mm-Kalibrierkugel an 25 Stellen mit einem 0.3 mm-Taster angetastet. Der bestimmte Radiusbereich $P = R_{max} - R_{min}$ betrug 78 nm. Bei aktivierter Tastkugelformkorrektur und nach Berücksichtigung der Formabweichung der Kalibrierkugel betrug P nur noch 14 nm, ein Resultat, das rund 50-mal besser ist, als was heute mit herkömmlichen, hoch genauen Koordinatenmessgeräten erzielt werden kann!

METAS hat auch bereits erste Messungen für Kunden durchgeführt. Besonders erwähnenswert ist die Durchmesserkalibrierung der Blende eines Strahlungsmessgerätes für ein Satellitenprojekt des Weltstrahlungszentrums (WRC) des Physikalisch-Meteorologischen Observatoriums Davos (PMOD), mit dem künftig die Sonnen-



13: Die Lage der vier Scanebenen auf der Testkugel.

aktivität noch genauer verfolgt werden kann (Bild 13).

Scanning

In der letzten Phase des Projekts wurde die Maschinensteuerung mit einem Scanning-Modus ergänzt. Man unterscheidet geregeltes und ungeregeltes Scanning. Während beim ungeregelten Scanning eine Bahn des abzufahrenden Profils mit den Antastpunkten fest vorgegeben wird, kann beim geregelten Scanning eine beliebige unbekannt Form angetastet werden.

Die Maschinensteuerung regelt die Bewegung so, dass die Tastkugel mit einer bestimmten Tasterauslenkung innerhalb einer wählbaren Schnittfläche an der Oberfläche des Werkstücks entlang gleitet. Dabei erhält man Profilschnitte mit einer hohen Punktdichte. Dies ist unerlässlich, um rasch eine unbekannt Form erfassen oder die Oberflächenqualität eines Werkstücks beurteilen zu können.

Da beim Scannen wesentlich schneller gemessen wird, liegt die Messunsicherheit üblicherweise höher als bei Einzelpunktantastung. Die vollständige und exakte Tastkopfkalibrierung hat beim Scannen eine grosse Bedeutung, da der Tastkopf nun wirklich messend eingesetzt wird, und nicht – wie oben beschrieben – die Antastkurve jeweils

auf einen virtuellen Antastpunkt mit Messkraft und Auslenkung Null extrapoliert wird. Die Steuerung kann alle dazu benötigten Abläufe automatisch durchführen.

Die Norm ISO 10360-4 beschreibt einen Test, um die Scanning-Qualität eines Koordinatenmessgerätes zu beurteilen. Auf einer Kalibrierkugel wird in vier Ebenen ein Profil gescannt und danach die Kugelform und der Zeitbedarf ausgewertet (Illustration 13).

Im geregelten Scanning-Modus erhielten wir mit einem 0.3 mm-Taster auf einer 1 mm-Kalibrierkugel in nur 97 Sekunden eine Formabweichung (T_{ij}) von weniger als 200 nm. Dieser Wert ist im Wesentlichen durch Ausreisser (Krater, Staub) bestimmt und schliesst die Formabweichungen der beiden Kugeln noch mit ein. Beim zehnmaligen Wiederholen dieses Tests war die Standardabweichung der Kugeldurchmesser nur 1.2 nm.

Die absolute Durchmesserabweichung zur Einzelpunktmessung, d. h. zur vorangegangenen Tasterkalibrierung, war kleiner als 10 nm. Dabei gilt es zu bedenken, dass jeweils nicht die gleichen Oberflächenbereiche der Kugeln einfließen. Erstaunlicherweise führt somit der implementierte Scanning-Modus zu keinem Verlust an Genauigkeit gegenüber der Einzelpunktantastungen. In Zukunft soll daher noch ein unregelmäßiger High-Speed-Scanning-Modus eingebaut und die Formabweichung der Tastkugel auch beim Scannen korrigiert werden.

Messunsicherheit

Eine der anspruchsvollen, für ein Metrologieinstitut jedoch zentralen Aufgaben ist die vollständige Charakterisierung, Korrektur und Kalibrierung der Messmaschine sowie die Bestimmung der Messunsicherheit. Messunsicherheitsabschätzungen für Koordinatenmessgeräte sind sehr komplex. Zusätzlich zur Messunsicherheit eines einzelnen Antastpunktes ist der Qualität des Messobjektes sowie dem Messablauf bzw. der Messstrategie Rechnung zu tragen.

Zusammen mit den tatsächlich vorliegenden Formfehlern des Messobjektes

sind Anzahl und Lage der Messpunkte bei der Einpassung der Geometrielemente von grosser Bedeutung. Die zwei letzteren Beiträge können am Besten durch eine numerische Simulation des Messprozesses (virtuelles Koordinatenmessgerät) abgeschätzt werden.

Für die Messunsicherheit einzelner Messpunkte sind die wichtigsten Beiträge (1σ) die 3D-Position des Verschiebetisches im ganzen Messvolumen (40 nm), die Wiederholbarkeit der Antastung (5 nm) sowie der Formfehler bzw. Formrestfehler der Tastkugel (20 nm).

Im ganzen Arbeitsvolumen von 90 mm x 90 mm x 38 mm liegt daher die Messunsicherheit einer Koordinatenangabe eines Antastpunktes bei etwa 80 nm. Der grösste Beitrag ist durch die Kalibrierung der Ebenheit und der Orthogonalität des Referenzspiegelkörpers gegeben, die künftig noch verbessert werden kann. Sind die

Objekte klein und wird ein Geometrie-parameter aus vielen Messpunkten berechnet, liegt die Messunsicherheit nur noch bei wenigen Nanometern.

Referenzen

[1] F. Meli, M. Fracheboud, S. Bottinelli, M. Bieri, R. Thalmann, J-M. Breguet, R. Clavel, «High precision, low force 3D touch probe for measurements on small objects», Proceedings of euspen Int. Topical Conference, Vol. 2, Aachen, May 2003, p. 411-414.
 [2] F. Meli, M. Bieri, R. Thalmann, M. Fracheboud, J-M. Breguet, R. Clavel, «Tastsinn von Koordinatenmessgeräten verfeinert», metINFO, Vol. 10, Nr. 1, 2003, p. 4-9.
 [3] T. Ruijl, «Ultra Precision Coordinate Measuring Machine», Thesis, ISBN 90-6464-287-7, 2001, The Netherlands.
 [4] Felix Meli, Alain Küng, «Performance of a low force 3D touch probe on an ultraprecision CMM for small parts», Proceedings of euspen 4th Int. Conference on Precision Engineering and

Nanotechnology, 2004, Glasgow, p. 270-271.
 [5] A. Küng, F. Meli, «Self calibration method for 3D roundness of spheres using an ultraprecision coordinate measuring machine», Proceedings of euspen 5th Int. Conference of the European Soc. for Precision Engineering and Nanotechnology, May 2005, Montpellier, p. 193-196.
 [6] F. Meli, A. Küng, R. Thalmann, «Ultra precision micro-CMM using a low force 3D touch probe», Proceedings of SPIE, Conf. on Recent Developments in Traceable Dimensional Measurements III, Vol. 5879, 2005, p. 240-247.



Von links: Alain Küng, Rudolf Thalmann, Felix Meli.

Appareil de mesure à coordonnées ultra-précis pour petite pièces

Afin de subvenir aux exigences future de qualité et de précision en microtechnologie, METAS a développé une nouvelle machine à mesurer 3D ultra-précise pour les pièces de petites dimensions.

Son succes est essentiellement basé sur deux éléments clé: La tête de mesure fût développée lors d'un projet de recherche lancé par METAS, en collaboration avec l'EPF Lausanne et le partenaire industriel Mecartex SA, Losone. Son architecture à bras de flexion permet au palpeur d'avoir des forces de contact extrêmement faible pour ne pas blesser les pièces à mesurer, tout en conservant une grande rigidité pour atteindre une précision de l'ordre du nanomètre.

La table de translation a été développée par Philips CFT. Elle intègre intelligemment tous les principes métrologiques permettant de s'affranchir ou de corriger au mieux toute erreur de déplacement.

Caractérisée dans ses moindres détails, la machine atteint une précision inégalée pour des mesures 3D : une répétitivité en 1 point < 5 nm et une précision (U95) < 80 nm dans tout son volume de travail. Son interface utilisateur intègre toutes les fonctionnalités de mesure par palpé et scanning, ce qui en fait un instrument aussi flexible que précis pour la recherche et l'industrie microtechnique.

Apparecchio di misurazione altamente accurato a coordinate per micropezzi

Per soddisfare le esigenze future di qualità e di incertitude nella microtecnologia, il METAS ha sviluppato un nuovo apparecchio di alta precisione per la misurazione geometrica di pezzi dalle dimensioni piccolissime.

Il tastatore fu sviluppato in occasione di un progetto promosso dal METAS, in collaborazione con il EPF di Losanna e il partner industriale Mecartex SA. Il tastatore realizzata con articolazioni flessibili che gli permette di esercitare forze di contatto estremamente deboli così da non danneggiare i pezzi da misurare, e, dall'altro, di mantenere una grande rigidità che gli consente di raggiungere una precisione dell'ordine del nanometro.

Il tavolo di traslazione fu sviluppato da Philips CFT. Tale tavolo integra tutti i principi metrologici permettendo di cancellare o correggere nel miglior modo qualsiasi errore di spostamento.

Caratterizzato nei minimi particolari, presenta una precisione mai raggiunta nelle misurazioni 3D l'apparecchio, vale a dire una ripetibilità in 1 punto < 5 nm e una incertezza (U95) < 80 nm. Il suo interfaccia utilizzatore integra tutte le funzionalità di misurazione mediante tastamento o scanning, rendendo il nostro apparecchio uno strumento tanto flessibile quanto preciso al servizio della ricerca e dell'industria microtecnica.

Ultra-precision coordinate measuring machine for small parts

In order to fulfil the expectations for quality and precision of future microtechnology, METAS has developed a new ultra-precise 3D measuring machine for small mechanical objects. Its success is mainly based on two key components: A new probe head was developed in a research project launched by METAS in collaboration with the EPF Lausanne and the industrial partner Mecartex SA, Losone. Based on flexure hinges, the probe exhibits very weak contact forces, but maintains a high rigidity to reach a precision of a few nanometers.

The translation stage was developed at Philips CFT. It incorporates in a clever way all metrological principles to cancel or correct to its best all remaining motion errors.

Characterised in its finest details, our µCMM thus exhibits an unprecedented precision for 3D measurements: a repeatability in one point < 5 nm and an uncertainty (U95) < 80 nm within its whole working volume. Its user interface integrates all functionality for point-to-point measurement and scanning, rendering this tool as flexible as precise for research and the micro-technology industry.