

Tastsinn von Koordinatenmessgeräten verfeinert

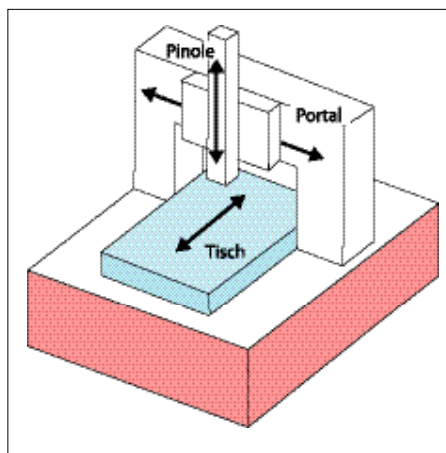
Mit der zunehmenden Miniaturisierung in der mechanischen und optischen Fertigung steigt auch der Bedarf an hochgenauen Geräten für die geometrische Messung von Kleinteilen. Herkömmliche Koordinatenmessgeräte sind in ihrer Anwendung vor allem bezüglich des Tastkopfes beschränkt. Im Rahmen eines Forschungsprojektes war METAS zusammen mit einem Hochschul- und einem Industriepartner an der Entwicklung eines hochgenauen und innovativen 3D-Tastkopfes beteiligt, der dank seiner kleinen Tastkraft den Einsatz winziger Tastkugeln ermöglicht.

FELIX MELI, MARCO BIERI, RUDOLF THALMANN (METAS); MAURICE FRACHEBOUD, JEAN-MARC BREGUET, REYMOND CLAVEL (EPFL); STEFANO BOTTINELLI (MECARTEX)

Die Koordinatenmesstechnik hat sich in den letzten 20 Jahren in der mechanischen Fertigung als allgegenwärtiges und unentbehrliches Hilfsmittel durchgesetzt. Die Fortschritte in der Computer- und Steuerungstechnik ermöglichen es, auch komplexe Messaufgaben automatisch und effizient durchzuführen.

Ein Koordinatenmessgerät besteht im wesentlichen aus meist drei Verfahrachsen und einem Tastsystem. Für die geometrische Vermessung eines Objektes wird seine Oberfläche in vorgegebenen Punkten durch Verfahren der Bewegungsachsen angetastet, wobei je nach Geometrie der Messmaschine entweder das Tastsystem, das Messobjekt oder beides sich bewegt.

Illustration 1 zeigt als Beispiel die Portalgeometrie der Messmaschine SIP Orion 6 des METAS [1]. In dieser Geometrie verfährt der Messtisch mit dem Objekt in Richtung der längsten Achse (x), während sich der Taster quer dazu in y- und z-Richtung bewegt. Sowohl die Verfahrachsen als auch der Tastkopf sind mit einem Messsystem für alle drei Raumrichtungen versehen. Das Resultat einer Antastung ist stets eine Kombination der gemessenen Koordinaten der Verfahrachsen und der gemessenen Auslenkung des Tastelementes bei der Berührung. Die Software von numerisch

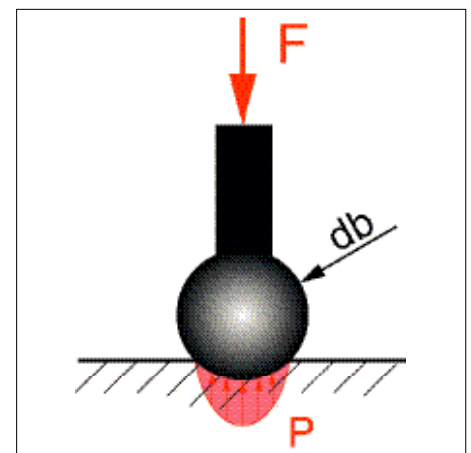


1: Prinzipskizze der Geometrie einer Portal-Koordinatenmessmaschine.

gesteuerten Koordinatenmessgeräten berechnet aus den angetasteten Punktwolken Form und Lage von Regelgeometrien. Dies sind beispielsweise Ebenen, Zylinder, Kugeln oder Konen, aber auch Gewinde oder Verzahnungen. Weiter entwickelte Programme sind auch in der Lage, Freiformflächen zu berechnen.

Miniaturisierung erfordert höhere Genauigkeit

Obwohl heute dank der Fortschritte in der Bildverarbeitung und wegen ihrer Schnelligkeit vermehrt optische Tastsysteme zum Einsatz kommen, werden für genaue Anwendungen und komplizierte Geometrien stets mechanische Taster verwendet. Als Tastelemente dienen meist Saphirkugeln, die mit hoher Genauigkeit, d. h. kleinen sphärischen Formabweichungen, mit Durchmessern von wenigen Zehntel Millimetern bis zu mehreren Millimetern gefertigt werden.



2: Prinzipskizze mit Tastkraft F, Kugeldurchmesser db und Flächenpressung P.

Mit der zunehmenden Miniaturisierung in der mechanischen und optischen Fertigung und den neuen Herstellverfahren in der Mikrosystemtechnik steigt der Bedarf, komplexe Kleinstteile mit grosser Genauigkeit geometrisch vermessen zu können. Grosse Koordinatenmessgeräte mit ihren ebenfalls relativ grossen Tastköpfen können zwar im Prinzip auch Taster mit kleinen Tastkugeln aufnehmen, die praktischen Grenzen dafür liegen jedoch bei rund 1 mm Kugeldurchmesser.

Kleinste Tastkräfte beeinflussen die Messung

Ein wichtiges Problem sind die bei der Antastung auftretenden Tastkräfte, die nicht nur zu elastischen, sondern auch zu plastischen Deformationen der Oberfläche führen können (Illustration 2). Die maximale Flächenpressung ist durch das Material des Messobjekts

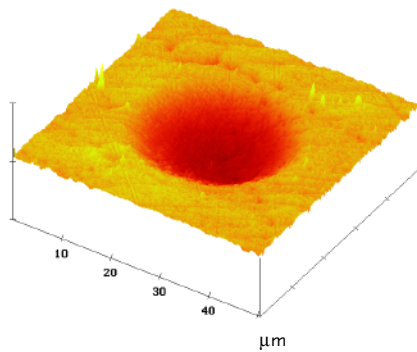
vorgegeben. So beträgt beispielsweise die maximal zulässige Antastkraft, bevor plastische Deformation auftritt, für eine Saphirkugel mit 1 mm Durchmesser auf einer Stahloberfläche 0.15 N und auf Aluminium sogar lediglich 30 mN. Diese zulässige Tastkraft verringert sich bei kleineren Tastkugeln dramatisch, ist diese doch proportional zum Quadrat des Kugeldurchmessers. Somit wird die maximal zulässige Antastkraft für eine 0.1 mm Kugel noch 100 mal kleiner, auf Stahl also lediglich 1.5 mN.

Wesentlich grösser als die statischen Antastkräfte sind die dynamischen Kräfte, die bei der Verzögerung der trägen Masse des Tasters bei der Antastung der Oberfläche wirken. Die Berechnung der dynamischen Kräfte ist relativ schwierig, ihre Auswirkungen lassen sich aber experimentell leicht nachweisen. Mit dem oben erwähnten Koordinatenmessgerät des METAS wurde eine polierte Aluminiumfläche unter Standardbedingungen mit einer Saphirkugel von 0.6 mm Durchmesser antastet. Illustration 3 zeigt den mit einem Rastersondenmikroskop (AFM) ausgemessenen verbleibenden Eindruck. Die Eindringtiefe beträgt 330 nm. Für viele industrielle Anwendungen sind zwar solche bleibenden Oberflächendefekte unbedeutend, bei hohen Genauigkeitsanforderungen oder weicheren Oberflächen werden die Messresultate jedoch entscheidend verfälscht.

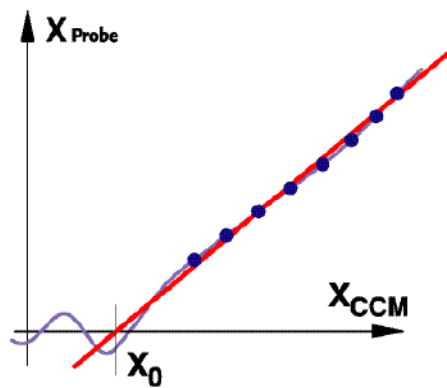
Projekt zur Entwicklung eines neuen Tastkopfes

Im Rahmen eines Projektes, das durch das Forschungsprogramm TOP NANO 21 unterstützt wurde [2], hat sich METAS zusammen mit einem Hochschulpartner (EPFL) und einem Industriepartner (Firma Mecartex in Losone) die Aufgabe gestellt, einen hochgenauen 3D-Tastkopf für kleine Tastelemente und kleine Tastkräfte zu entwickeln [3]. Das Pflichtenheft für diese Neuentwicklung umfasste folgende Anforderungen:

- 3D-Tastkopf zur Aufnahme von Tastkugeln mit 0.1 mm bis 1 mm Durchmesser und einer Antastunsicherheit von wenigen Nanometern,



3: Eindruck in einer Aluminium-Oberfläche, entstanden beim Antasten mit einer Saphirkugel von 0.6 mm Durchmesser. Eindringtiefe 330 nm.

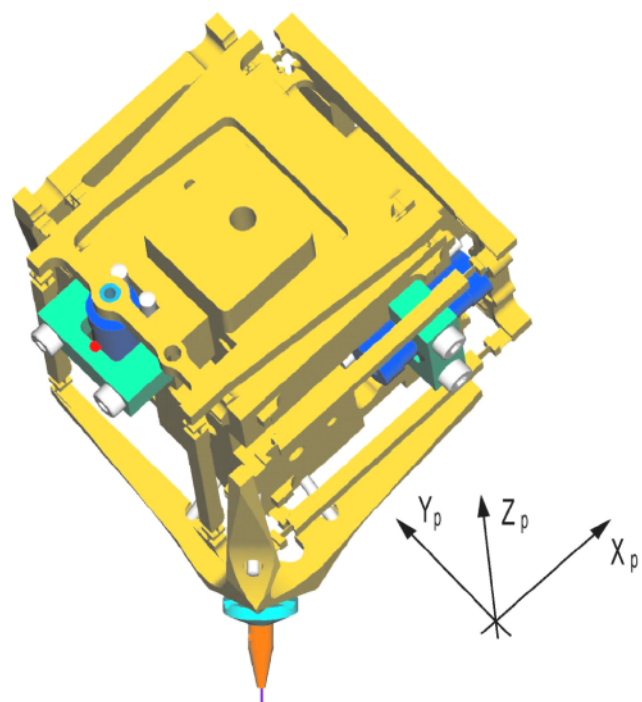


4: Antastkurve mit Bestimmung des messkraftfreien Antastortes x_0 .

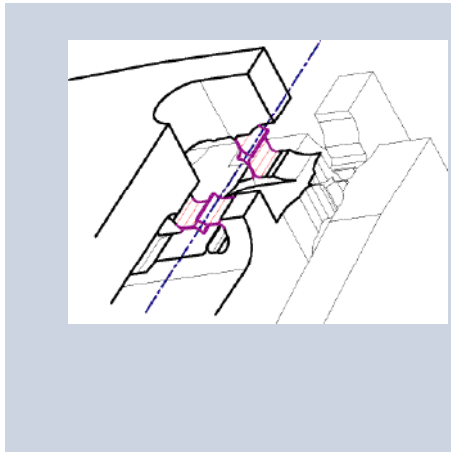
- Messbereich des Tasters in jeder Richtung von mehr als 100 μm ;
- richtungsunabhängige Antastkraft kleiner als 0.5 mN bei einer Auslenkung von 25 μm (kleine Steifigkeit),
- möglichst geringe bewegliche Masse zur Vermeidung grosser dynamischer Kräfte beim Antasten,
- Der Antastvorgang soll den messkraftfreien Antastort bestimmen, um elastische Vorgänge beim Antasten zu eliminieren. Das ist möglich, wenn bei jedem Antastvorgang eine komplette Kraft-Weg-Kurve gemessen wird. Durch Extrapolation kann der Antastort für Messkraft Null berechnet werden (Diagramm 4).

Aufbau und Funktionsweise

Für den 3D-Taster ist eine spezielle Struktur entworfen worden. Diese elastische Struktur 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 (Illustration 5).



5: Kinematische Struktur des 3D-Tasters: Das gelbe Bauteil ist aus einem einzigen Stück gefertigt.

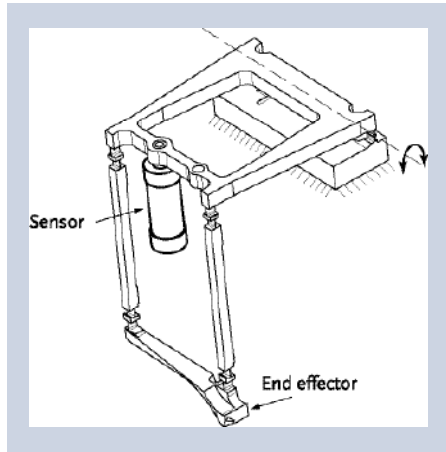


6: Zwei Festkörpergelenke im Detail.

Die Struktur wird aus einem einzigen Stück Aluminium durch Fräsen und bei den Festkörpergelenken mittels Drahterosion sehr exakt herausgearbeitet. Durch dieses Vorgehen erübrigt sich ein Zusammenbau aus einzelnen Komponenten. Zeit und Kosten werden dadurch gespart und es ist einfacher, die genaue relative Lage der Bauteile zu gewährleisten. Aluminium wurde vor allem wegen der guten Wärmeleitfähigkeit gewählt. Aluminium ist auch leicht und ergibt damit höhere Resonanzfrequenzen und kleinere dynamische Antastkräfte. Die äquivalente bewegliche Masse beträgt nur 7 g. Die mechanischen Eigenschaften, die Langzeitstabilität und die Bearbeitbarkeit der gewählten Aluminiumlegierung sind ebenfalls wichtig.

Die Festkörpergelenke werden durch dünne Lamellen von nur 60 µm Dicke gebildet (Illustration 6). Eine spezielle Behandlung stabilisiert die Oxydschicht auf der Oberfläche der Festkörpergelenke und sorgt so für dauerhafte mechanische Eigenschaften.

Die Verschiebung der drei transversalen Freiheitsgrade des Tastkopfes wird durch induktive Wegaufnehmer gemessen. Sie sind klein, günstig und begrenzen die Bewegung mechanisch nicht, wie dies beispielsweise bei kapazitiven Sensoren der Fall wäre. Beim gewählten Messweg von ± 200 µm liegt das Rauschen im Bereich von wenigen Nanometern. Eine unabhängig eingebaute mechanische Wegbegrenzung erlaubt eine Tasterbewegung von



7: Kinematik einer Achse, links nur mit Positionssensor, rechts nur mit Element zur magnetischen Kompensation der Gravitation.

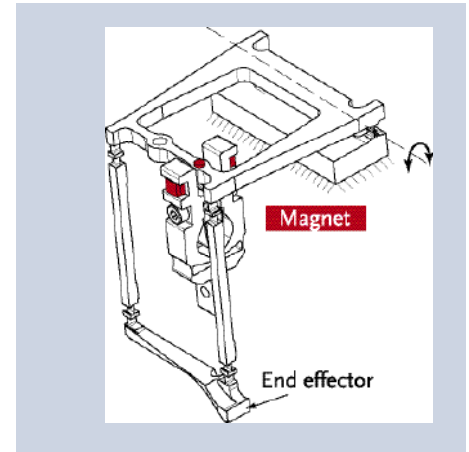
± 0.5 mm in allen Richtungen und schützt die kinematische Struktur vor einer Überbeanspruchung.

Magnete kompensieren Gravitationskraft

Wegen der geringen Steifigkeit 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 annähernd isotrop. Diese Anordnung erleichtert auch den Zugang des Tasters zum Werkstück. Allerdings bedingt die schiefe Lage des Tasterkoordinatensystems eine numerische oder elektronische Transformation in das Koordinatensystem der Bewegungsachsen des Koordinatenmessgerätes.

Drei identische Strukturen ineinander verschachtelt

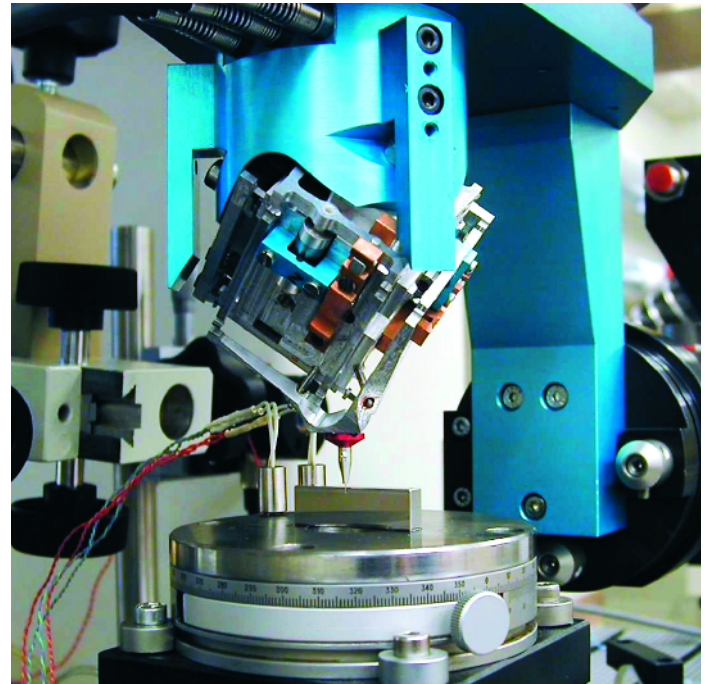
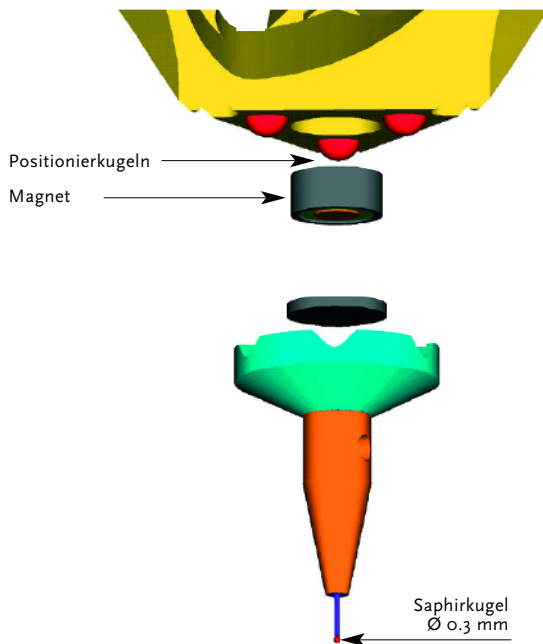
Um die Funktionsweise der Struktur besser verstehen zu können, ist in Illustration 7 jeweils nur eine einzelne Achse dargestellt. In der linken Abbildung ist nur das induktive Messsystem eingezeichnet, während das magnetische System zur Kompensation der Gravitation weggelassen wurde. Letzteres ist rechts abgebildet. Durch Zusammenfügen von drei solchen Strukturen erhält man den kompletten 3D-Taster.



Die mechanischen Eigenschaften der Struktur wurden mit der Methode der finiten Elemente modelliert und optimiert. Die berechnete Resonanzfrequenz für den ersten Mode liegt bei 11 Hz und für die Moden 2 bis 4 deutlich höher zwischen 2'080 Hz und 4'870 Hz. Wegen der geringen Steifigkeit und der damit verbundenen hohen mechanischen Empfindlichkeit eignet sich dieses Tastsystem nur für Koordinatenmessgeräte mit ortsfestem Tastkopf. Dazu muss das Werkstück in allen drei Raumrichtungen bewegt werden können.

Tastkugel

Das Werkstück wird üblicherweise mit einer kleinen Saphirkugel angetastet. Die Tastkugel ist an einem Hartmetallschaft befestigt und bildet mit einer kleinen Halterung den Taster. Dieser wird mit einem Magneten am Tastkopf befestigt und ist somit jederzeit austauschbar. Drei Kugeln im Tastkopf greifen in drei V-Nuten des Tasters und sichern so seine eindeutige Lage (Illustration 8). Die magnetische Befestigung dient auch als mechanische Sicherung und lässt den Taster bei einer allfälligen Kollision mit dem Werkstück ausrasten. Eine gute Rundheit der Tastkugel ist zur Erzielung kleiner Messunsicherheiten bei einer 3D-Antastung unerlässlich. Kommerziell sind Taster mit Kugeldurchmessern bis zu 0.2 mm erhältlich. Wir werden versuchen, künftig auch noch kleinere Tastelemente zu erhalten.

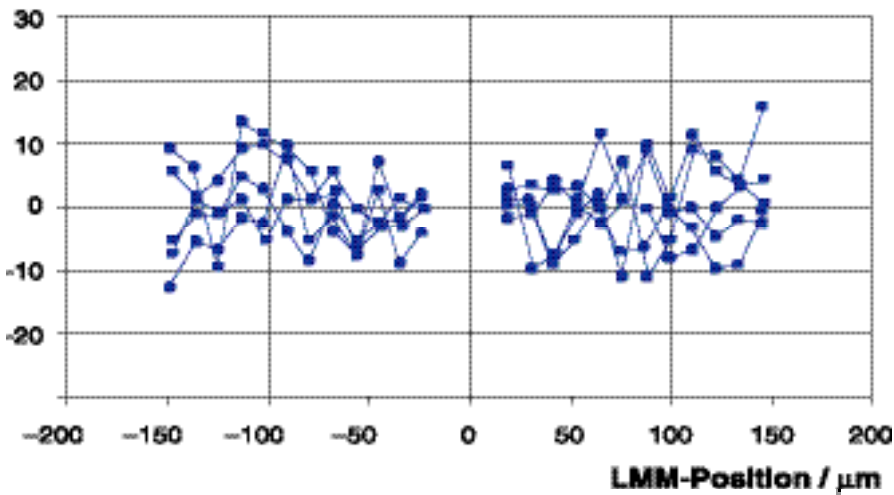


8: Magnetische Tasterbefestigung für einfachen Tasterwechsel und als mechanische Sicherung.

9: 3D-Taster im Test auf der Lehrenmessmaschine LMM5.

rechtem Antastpunkt abzüglich der Endmasslänge ergibt die Tasterkonstante. Sie ist im Wesentlichen durch den Tastkugeldurchmesser gegeben. Die Wiederholbarkeit und Stabilität der Tasterkonstante sind wichtige Eigenschaften eines Tastersystems. Die jeweils aus fünf Bestimmungen der Tasterkonstanten ermittelte Standardabweichung lag immer im Bereich von 5 nm. Dabei ist zu beachten, dass dieser Wert auch das Rauschen des Interferometers und die Stabilität der Lehrenmessmaschine mit einschliesst. Die Tasterkonstante blieb über einen Zeitraum von 26 Stunden innerhalb der erwarteten Streuung stabil. Diagramm 10 zeigt die gute Wiederholbarkeit und Linearität des Tasters in einen Messbereich von $\pm 150 \mu\text{m}$. Die Linearität ist so gut, dass auch mit nur einem Messpunkt auf der Antastkurve gearbeitet werden könnte. Die Messunsicherheit würde zwar geringfügig grösser, der Antastvorgang würde damit jedoch einfacher und schneller.

Tasterabweichung / nm



10: Linearitätsabweichung von fünf Antastkurven, jeweils linke und rechte Seite.

Erste Messresultate

Die vollständige Charakterisierung eines 3D-Tasters kann nur zusammen mit einem Koordinatenmessgerät erfolgen. Mit den zur Zeit am METAS verfügbaren Geräten würden 3D-Messungen jedoch hauptsächlich durch die Messmaschine begrenzt. Wir haben daher die ersten Tests auf unserer einachsigen, mit einem Laserinterferometer bestückten Lehrenmessmaschine durchgeführt (Illustration 9). Bei Versuchen mit 1D-Tastern wurden damit

Wiederholbarkeiten von weniger als 5 nm erzielt. Mit der Lehrenmessmaschine können allerdings nur horizontale Antastrichtungen untersucht werden. Durch die besondere Lage des Tastkopfkoordinatensystems (auf Würfecke stehend) sind jedoch stets zwei oder alle drei Achsen des Tasters an der Messung beteiligt.

Der Test des 3D-Tasters bestand im wiederholten Antasten eines Endmasses auf der linken und der rechten Seite. Die Differenz zwischen linkem und

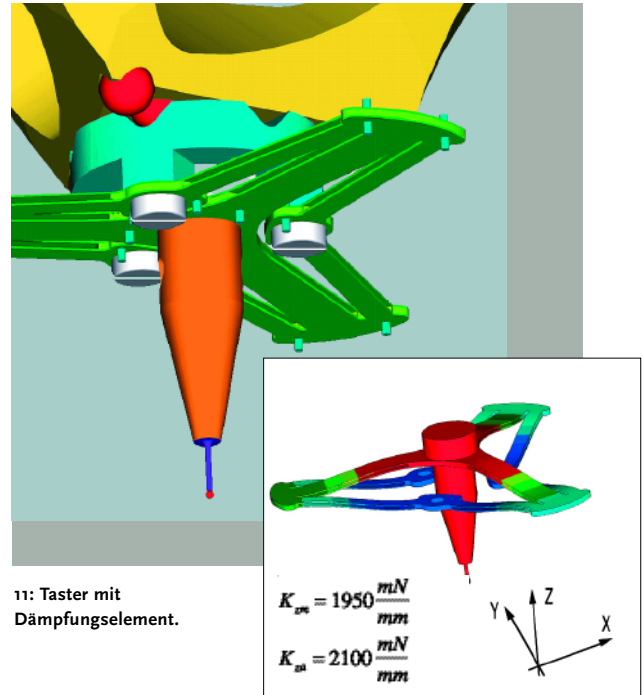
Weiterentwicklung und Ausblick

Weitere Modellrechnungen haben gezeigt, dass die dynamische Steifigkeit in der z-Richtung nach wie vor zu gross ist. Durch das Einfügen eines Dämpfungselementes zwischen Taster und Tastkopf kann dieses Problem gelöst

werden (Illustration 11). Die Geometrie eines solchen Dämpfungselements wurde wiederum durch Modellierung mit finiten Elementen gefunden. Erste Versuche zeigen, dass dieses Element auch Vibrationen dämpft, die von der Umgebung auf die Messmaschine und von dort zur Tastkugel gelangen. Mit dem Dämpfungselement rutscht daher die Tastkugel weniger leicht auf der Probenoberfläche herum.

In einem neuen METAS-Projekt soll nun ein ultrapräzises Koordinatenmessgerät für kleine Objekte bis ca. 50 mm Grösse entwickelt werden. Als Basis für dieses neue Gerät dient ein 3D-Manipulator, der von Philips CFT (Center for Manufacturing Technology)

im Rahmen eines vierjährigen, von einer Doktorarbeit begleiteten Projektes entwickelt wurde [4]. Dieser metrologisch einwandfrei aufgebaute Manipulator bietet einige äusserst innovative Konzepte und kann – kombiniert mit dem neuen Taster und den guten Laborbedingungen im METAS – zu einem Koordinatenmessgerät für Kleinenteile mit einer bisher kaum erreichten Messgenauigkeit weiterentwickelt werden.



11: Taster mit Dämpfungselement.

Referenzen

- [1] R. Thalmann, *Vorstoss in neue Dimensionen*, metINFO, Vol 8, 1/2001.
- [2] Projekt *NanoTouch*, einjähriges TOP NANO 21 Forschungsprojekt. TOP NANO 21 ist ein Technologie orientiertes Programm des ETH-Rates. Projektleitung: Institut de Production Robotique (IPR) der EPFLausanne (<http://LSRO.EPFL.ch>). Industriepartner: MECARTEX, Losone, ein kleines Unternehmen, das aus den Aktivitäten des LSRO der EPFL entstanden ist (www.mecartex.com). Weiterer Partner: METAS.
- [3] M. Fracheboud, J.-M. Breguet, F. Meli and R. Clavel, *Touch probing device*, European Patent Application, Mecartex SA, 2002.
- [4] T. Ruijl, *Ultra Precision Coordinate Measuring Machine*, Thesis, ISBN 90-6464-287-7, 2001, The Netherlands.



Rudolf Thalmann (mitte), Sektionschef Länge und Optik, Felix Meli (links) und Marco Bieri (alle METAS). Weiter am Projekt massgebend beteiligt: Maurice Fracheboud, Jean-Marc Breguet und Reymond Clavel (EPFL) sowie Stefano Bottinelli (MECARTEX).

Sensibilité du toucher améliorée des instruments de mesure par coordonnées

Avec la continue miniaturisation des composants mécaniques et optiques, les laboratoires de métrologie doivent s'équiper d'instruments de haute précision pour mesurer la géométrie de petites pièces. Les forces relativement grandes des palpeurs actuels peuvent causer des dommages à la surface des pièces à mesurer et ainsi fausser les résultats de la mesure. Pour éviter ce problème, spécialement lorsque l'on mesure avec une bille d'un diamètre inférieur à 0,2 mm, il est nécessaire de développer un palpeur avec des forces environ cent fois inférieures aux systèmes commerciaux actuels. Dans le cadre d'un projet de recherche de TOP NANO 21 auquel METAS a participé, en partenariat avec l'EPFL et l'entreprise MECARTEX à Losone, un nouveau type de palpeur 3D a été développé. L'innovation de cet appareil est d'utiliser une cinématique parallèle dont les déformations, dues aux zones élastiques, sont mesurées à l'aide de capteurs selon les 3 axes (xyz). L'ensemble de la structure est usinée dans un seul bloc de métal par usinage conventionnel à l'exception des zones élastiques réalisées par électro-érosion. Les premiers résultats sont très encourageants. On obtient, avec une force de mesure inférieure à 0,5 mN, une répétabilité de l'ordre de 5 nm. Dans le but d'exploiter au mieux ce nouveau palpeur, METAS développe actuellement un nouvel instrument de mesure par coordonnées ultra précis. Notre but est d'offrir dans un futur proche un service de calibration et de mesures de petites pièces dont les dimensions sont inférieures à 50 mm.

Affinare il «tatto» degli apparecchi di misura a coordinate (CMM)

Con la sempre maggiore miniaturizzazione dei prodotti meccanici e ottici aumenta anche la necessità di disporre di apparecchi di alta precisione per la misurazione geometrica di oggetti molto piccoli. I comuni apparecchi di misura a coordinate sono limitati nel loro impiego soprattutto dalla testina di misura. Infatti la pressione relativamente elevata esercitata da questo sensore tridimensionale durante la misura, può danneggiare lievemente la superficie dell'oggetto in esame e quindi portare a un errore di misurazione. Affinché non si producano deformazioni permanenti della superficie, nemmeno utilizzando stili con sfere di diametro molto piccolo, inferiore a 0.2 mm, occorre sviluppare nuovi tastatori che esercitino pressioni di ca. 100 volte inferiori a quelle dei tastatori disponibili oggi in commercio. Nell'ambito del progetto TOP NANO 21 il METAS, insieme al Politecnico federale di Losanna e alla ditta Mecartex di Losone, ha sviluppato un nuovo tastatore tridimensionale. In termini di prestazioni, questo sensore rappresenta una vera innovazione. Infatti i primi test sono stati estremamente promettenti. Tale sensore è basato su una cinematica parallela realizzata con articolazioni flessibili. Grazie alla forza di contatto estremamente piccola, inferiore a 0.5 mN, è possibile ottenere una riproducibilità dell'ordine di 5 nm. Il nuovo tastatore sarà montato su un apparecchio di misura a coordinate ultrapreciso che al momento è in fase di realizzazione nell'ambito di un altro progetto del METAS. L'obiettivo è di poter offrire in avvenire prestazioni di assoluto valore negli ambiti della misura e della calibrazione di oggetti di grandezza inferiore a ca. 50 mm.

Refined sense of touch for coordinate measuring machines

With the ongoing miniaturisation in the mechanical and optical production there is a demand for highly accurate instruments for geometrical measurement of small parts. So far, the limiting factor for miniaturised applications of a coordinate measuring machine was mainly the probe head. The relatively large probing forces may damage the work piece surface and thus falsify the measurement results. If probe spheres with a diameter smaller than 0.2 mm are to be used without leaving any permanent surface indentations, new probe heads with forces about 100 times smaller than the today's commercial systems are to be developed. In the context of a TOP NANO 21 research project METAS participated, together with EPFL and an industrial partner, in the development of a new 3D probe head. The innovative design is based on a parallel kinematics with flexure hinges. The first test measurements were very successful: with probing forces smaller than 0.5 mN the repeatability was in the order of 5 nm. The new probe head will be used on an ultra precise coordinate measuring instrument which is actually being developed within another METAS project. Our goal is to offer calibration and measurement services for small parts up to a size of about 50 mm in the near future.