

Realisierung und Überprüfung eines 3D-Tastsystems für Mikro-Bauteile

Thomas Liebrich, Wolfgang Knapp, Konrad Wegener

Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung (IWF), ETH Zürich, CH - 8092 Zürich,

E-Mail: liebrich@iwf.mavt.ethz.ch

Kurzfassung

Neue Fertigungsverfahren wie Mikro-Fräsen, Mikro-EDM oder die Laserbearbeitung ermöglichen Bauteile mit zusätzlichen Funktionen, kleineren Abmessungen oder erhöhter Effizienz. Die Anwendung solcher Bauteile erstreckt sich von der Unterhaltungselektronik über das Transportwesen bis hin in den Medizinalbereich. Damit diese Mikro-Bauteile zuverlässig funktionieren, besitzen sie kleinere Toleranzen, welche teilweise im sub-Mikrometerbereich liegen. Bei der geometrischen Überprüfung solcher Bauteile mit Koordinatenmessgeräten (KMG) sind neben der Zugänglichkeit mit dem Tastelement auch bleibende Beschädigungen der gemessenen Oberflächen kritisch. Zudem liegen die Messunsicherheiten konventioneller KMG teilweise im Bereich der zu prüfenden Toleranzen, so dass die Erfüllung der geforderten Bauteiltoleranzen nicht nachgewiesen werden kann. Verschiedenste Tastsysteme für Mikro-Bauteile sind bereits Stand der Technik. Jedoch besitzen diese Systeme meistens einen sehr kleinen Messbereich von etwa $10 \mu m$, was sie sehr empfindlich in ihrer Handhabung macht. Zudem fehlt die Möglichkeit, den Taststift zu wechseln (beispielsweise nach einer Kollision) und diese Tastsysteme sind sehr teuer.

In diesem Beitrag wird ein neues 3D-Tastsystem für Mikro-Bauteile mit einem Messbereich von $100 \mu m$ vorgestellt, welches kapazitive Sensoren verwendet, um die Auslenkung des Tastelementes zu bestimmen. Der Aufbau des Tastsystems (siehe Bild 1) ist nicht nur für isotrope Steifigkeiten am Tastelement von $84 \frac{N}{m} \pm 25 \frac{N}{m}$ (Unsicherheit der Simulation) ausgelegt, sondern auch für eine kostengünstige Fertigung und Montage der einzelnen Komponenten.

Zur Auslegung der Geometrie, besonders diejenige der Festkörpergelenke, wird ein auf der Finiten-Elementen-Methode basierendes Verfahren vorgestellt. Damit ist es möglich, die Steifigkeiten am Tastelement simulativ zu bestimmen und somit das Tastsystem an unterschiedlichste Einsatzgebiete - beispielsweise für konventionelle KMG, Mikro-KMG oder Werkzeugmaschinen - bei gleichen Aussenabmessungen anzupassen. Die mit Kraftmessungen experimentell überprüften Steifigkeiten am Tastelement betragen $78 \frac{N}{m} \pm 26 \frac{N}{m}$ und stimmen somit im Rahmen der Unsicherheiten mit den simulierten Steifigkeiten überein. Die Voraussetzungen und Anforderungen an das Tastsystem, dessen Simulation sowie die Herstellung und Montage der einzelnen Komponenten werden erläutert, damit Simulation und praktische Umsetzung übereinstimmen.

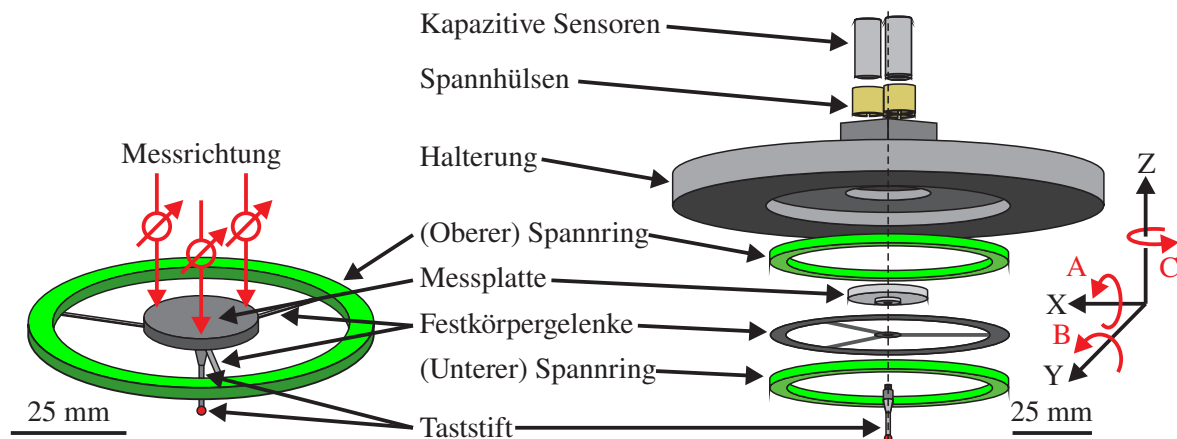


Bild 1: Schematischer Aufbau des 3D-Tastsystems.

Die geometrische Prüfung auf dem hochgenauen KMG 'ISARA' ergibt einen Linearitätsfehler in Antastrichtung von $0.12 \mu m$ oder 1.2% über einen Verfahrweg von $10 \mu m$. Die maximale Antastabweichung (MPE_p) über 541 Antastpunkte an einer Referenzkugel beträgt $0.68 \mu m \pm 0.01 \mu m$ Spanne über drei Messungen. Die mittlere Wiederholbarkeit in den einzelnen Messpunkten bei drei aufeinanderfolgenden Messungen an der Referenzkugel beträgt $0.01 \mu m$. Aufgrund dieser guten Wiederholbarkeit in den einzelnen Antastpunkten besteht die Möglichkeit, die Antastabweichungen zu kompensieren und somit die MPE_p deutlich zu reduzieren. Die Robustheit des Tastsystems gegenüber Kollisionen wird mit einer erzwungenen Kollision untersucht. Die mittlere Wiederholbarkeit in den einzelnen Messpunkten an der Referenzkugel beträgt mit der erzwungenen Kollision $0.02 \mu m$, ohne die erzwungene Kollision $0.01 \mu m$.

1 Motivation

In immer mehr Produkten werden Mikro-Bauteile eingesetzt mit dem Ziel, mehr Funktionen in Produkten unterzubringen oder kleinere, leistungsfähigere und effizientere Produkte zu realisieren. Das Anwendungsgebiet von Mikro-Bauteilen ist äusserst vielseitig und betrifft beispielsweise die Unterhaltungs- und Kommunikationstechnik, den Medizinalbereich, das Transportwesen, die Energie- oder Militärtechnik [1] [2].

Die geometrische Prüfung von Mikro-Bauteilen stellt neue Anforderungen an die Messtechnik: einerseits müssen die Tastsysteme auf geringe Antastkräfte ausgelegt sein, damit plastische Deformationen an der Werkstückoberfläche, verursacht durch die mechanische Antastung, vermieden werden; andererseits müssen die Messunsicherheiten der Tastsysteme reduziert werden, damit Mikro-Bauteile mit ihren kleinen Toleranzen, welche typischerweise im sub-Mikrometerbereich liegen, auf Toleranzhaltigkeit überprüft werden können.

Wie in [3] dargestellt, sind bereits einige Tastsysteme speziell für Mikro-Bauteile entwickelt worden, welche Antastkräfte im Bereich von einigen mN oder sogar weniger haben. Einige dieser Systeme zeichnen sich durch Messunsicherheiten kleiner als $0.1 \mu m$ aus, sind jedoch aufgrund ihres kleinen Messbereiches von teilweise lediglich $10 \mu m$ sehr empfindlich in ihrer Handhabung. Zudem fehlt die Möglichkeit, den Taststift zu wechseln, beispielsweise nach einer Kollision. Die Fertigung und Montage ist meistens sehr komplex und aufwendig. Deshalb wird ein neues 3D-Tastsystem für Mikro-Bauteile vorgestellt, welches folgende Eigenschaften hat:

- Tastsystem in Voraus berechenbar bzw. auslegbar auf Soll-Steifigkeit abhängig von Messaufgabe, beispielsweise für Mikro-KMG, konventionelles KMG oder Werkzeugmaschine;
- Messbereich: $> \pm 100 \mu m$;
- Messunsicherheit: $< 1 \mu m$;
- Isotrope Steifigkeit an der Tastkugel kleiner als $100 \frac{N}{m}$ zur Vermeidung plastischer Deformationen am Werkstück;
- Auswechselbarer Taststift;
- Einfache und kostengünstige Herstellung der einzelnen Komponenten aus

Standardmaterial auf Werkzeugmaschinen zur Metallbearbeitung.

2 Aufbau und Auslegung des 3D-Tastsystems

2.1 Aufbau des Tastsystems

In Bild 1 sowie 2 ist der Aufbau des Tastsystems dargestellt. Der Taststift ist über ein Gewinde in die Messplatte geschraubt und somit im Falle einer Beschädigung auswechselbar bzw. kann an die jeweilige Messaufgabe angepasst werden (z.B. Taststiftlänge). Die Messplatte wird von Festkörpergelenken gehalten, welche wiederum mit zwei Spannrings in die Halterung des Tastsystems geklemmt werden.

Die Messplatte besitzt drei zulässige Bewegungsrichtungen: die Z-Translation sowie die beiden Rotationen A und B (siehe Bild 1). Die anderen drei Bewegungsrichtungen in X- und Y-Richtung sowie die Orientierung C werden durch die Festkörpergelenke gesperrt. Aus den drei zulässigen Bewegungsrichtungen Z, A und B der Messplatte wird die Verlagerung der Tastkugel in X-, Y- und Z-Richtung berechnet.

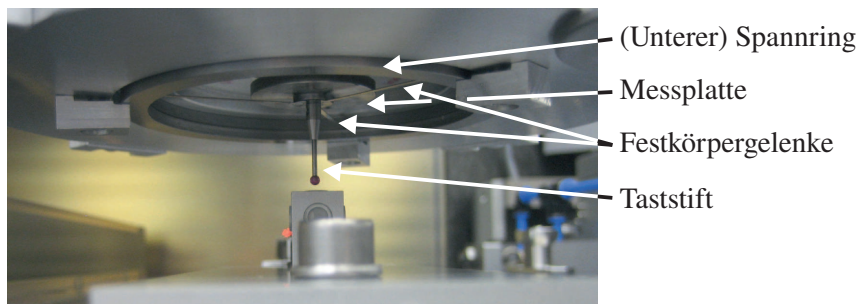


Bild 2: Das realisierte 3D-Tastsystem für Mikro-Bauteile.

Die Änderungen der Z-Lage sowie der Orientierungen A und B der Messplatte werden mit drei kapazitiven Sensoren erfasst, welche in der Halterung des Tastsystems geklemmt werden und rechtwinklig auf die Oberseite der Messplatte ausgerichtet sind.

Das Tastsystem besitzt einen einfachen mechanischen Aufbau mit wechselbarem Taststift, zudem können die benötigten Komponenten auf konventionellen Werkzeugmaschinen für die Metallbearbeitung hergestellt werden.

2.2 Auslegung des Tastsystems

Für die Eigenschaften des Tastsystems sowie dessen Anwendung sind die Steifigkeiten an der Tastkugel sowie der Messbereich entscheidend. Wie in Bild 3 dargestellt, werden zunächst verschiedene Geometrien der Festkörpergelenke bezüglich ihrer Steifigkeit an der Messplatte mittels FEM-Berechnungen untersucht und verglichen. Aufgrund der hohen Steifigkeiten an der Messplatte in X-, Y- und C-Richtung sowie kleinen Steifigkeiten in den zulässigen Bewegungsrichtungen der Messplatte in Z-, A- und B-Richtung wird die sternförmige Geometrie der Festkörpergelenke (siehe Bild 3 A) gewählt [4] [5].

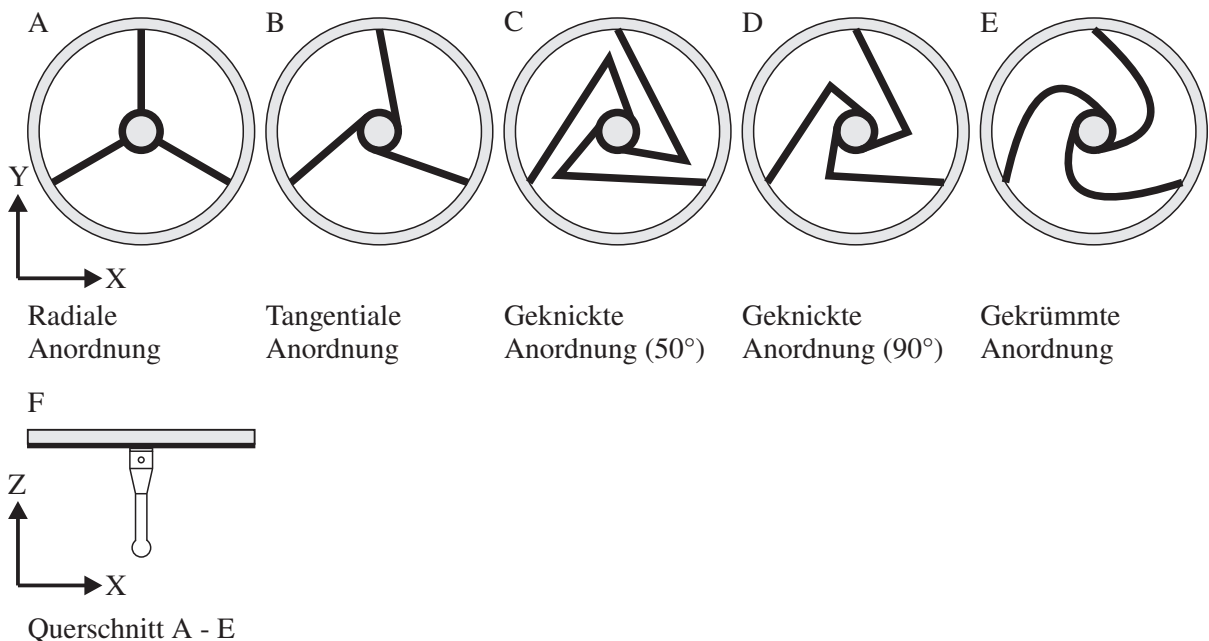


Bild 3: Vergleich verschiedener Geometrien der Festkörpergelenke.

Die detaillierte Auslegung des Tastsystems basiert ebenfalls auf FEM-Berechnungen, so dass die Geometrie der Festkörpergelenke an die jeweiligen Steifigkeitsvorgaben angepasst werden kann. Zudem ist es möglich, die Steifigkeiten in allen drei Raumrichtungen einander anzupassen, so dass die Steifigkeiten an der Tastkugel in X-, Y- und Z-Richtung isotrop werden.

Im Folgenden wird ein Tastsystem mit simulierten Steifigkeiten an der Tastkugel von $84 \frac{N}{m} \pm 25 \frac{N}{m}$ (Unsicherheit der Simulation) präsentiert, welches sich dadurch für die Vermessung von sehr kleinen und sehr empfindlichen Bauteilen eignet, ohne deren Oberfläche zu beschädigen. Der Messbereich ist auf Tastkugelverlagerungen von $100 \mu m$ ausgelegt.

Damit die simulierten Steifigkeiten an der Tastkugel in der Praxis erreicht werden, muss die Form der Festkörpergelenke mit jener der FEM-Berechnungen übereinstimmen. Durch den Einfluss der Gewichtskraft werden die Festkörpergelenke von ihrer neutralen Lage ausgelenkt, so dass die Steifigkeit im Betriebspunkt des Tastsystems in Z-Richtung etwa um Faktor 10 gegenüber der ideal ebenen Geometrie zunimmt. Deshalb wird ein Gewichtsausgleich realisiert (siehe Bild 4), der die Durchbiegung der Festkörpergelenke aufgrund der Gravitation kompensiert. Der Gewichtsausgleich basiert auf dem Prinzip einer Waage, wobei das Gegengewicht nicht nur justiert werden kann, sondern auch in Öl schwimmt, um Schwingungen an der Tastkugel, verursacht durch das KMG, die Antastung oder Umgebungseinflüsse, zu dämpfen. Alternativ zu einem Gewichtsausgleich besteht auch die Möglichkeit, die Steifigkeiten des Tastsystems in X-, Y- und Z-Richtung ohne Gewichtsausgleich isotrop auszulegen. Dies resultiert jedoch in einem um mehr als viermal grösseren Aussendurchmesser der Festkörpergelenke (310 mm gegenüber 75 mm). Zudem sind die Steifigkeiten mit $156 \frac{N}{m}$ deutlich grösser als jene eines Tastsystems mit Gewichtsausgleich ($84 \frac{N}{m}$) und kleinerem Aussendurchmesser der Festkörpergelenke (75 mm). Einen grossen Einfluss auf die Steifigkeiten an der Tastkugel haben auch die Prozessparameter, mit welchen die Festkörpergelenke hergestellt werden. Beispielsweise verursachen nicht optimierte Prozessparameter während des Laserschneidens der Festkörpergelenke einen Grat auf den Gelenken, durch welchen die Steifigkeit in Z-Richtung um bis zu Faktor 3 erhöht wird [6].

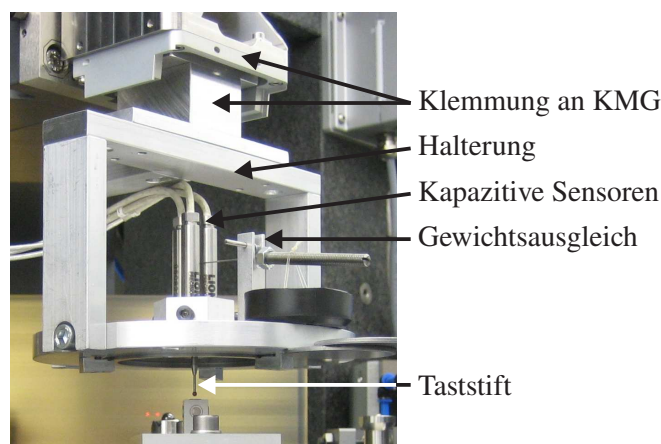


Bild 4: Realisierung des Tastsystems mit einem Gewichtsausgleich zur Kompensation der Durchbiegung der Festkörpergelenke aufgrund der Gravitation.

Die Festkörpergelenke werden aus Lehnband 1.4310, welches sich hierfür aufgrund seiner tolerierten Blechdicke und guten Verfügbarkeit mit unterschiedlichen Dicken hervorragend eignet, mittels EDM ausgeschnitten.

2.3 Überprüfung der Steifigkeiten

Die mit Kraftmessungen experimentell überprüfte Steifigkeit beträgt $78 \frac{N}{m} \pm 26 \frac{N}{m}$ in X- und Y-Richtung sowie $96 \frac{N}{m} \pm 28 \frac{N}{m}$ in Z-Richtung. Wie in Bild 5 ersichtlich, verhalten sich die Steifigkeiten an der Tastkugel in der XY-Ebene isotrop. Im Rahmen der Unsicherheiten stimmen die simulierten mit den gemessenen Steifigkeiten überein (siehe Tabelle 1) und verhalten sich in alle drei Raumrichtungen isotrop.

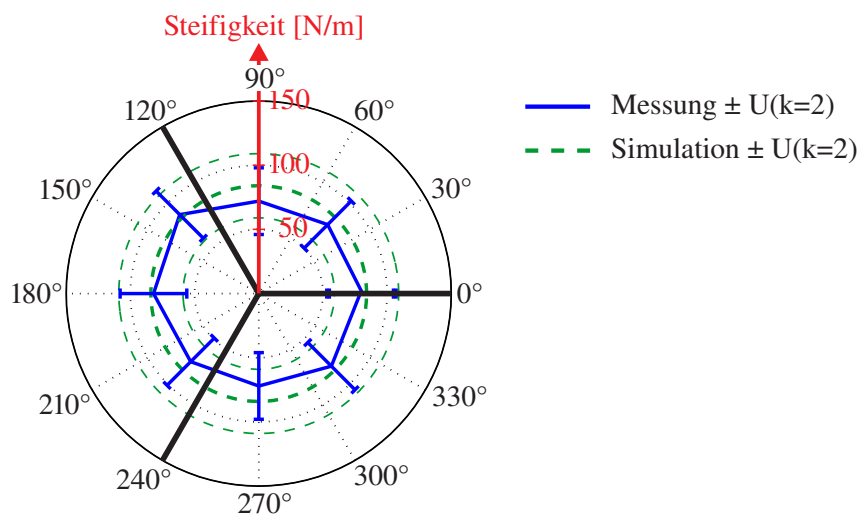


Bild 5: Ergebnisse der Steifigkeitsmessungen an der Tastkugel in der XY-Ebene (fett gezeichnete schwarze Linien: Orientierung der Festkörpergelenke).

Tabelle 1: Vergleich zwischen berechneten und gemessenen Steifigkeiten an der Tastkugel.

Gemessene Richtung	Gemessene Steifigkeit $\left[\frac{N}{m}\right]$	Berechnete Steifigkeit $\left[\frac{N}{m}\right]$
X, Y ^(a)	78 ± 26	84 ± 25
Z ^(b)	96 ± 28	81 ± 20

^(a) Mittelwert der Messungen in der XY-Ebene, jeweils 45°. Jede Messung einmal wiederholt.

^(b) Mittelwert von drei Messungen in Z-Richtung.

3 Geometrische Prüfung des Tastsystems

Die geometrische Prüfung des Tastsystems erfolgt auf dem hochgenauen Koordinatenmessgerät 'ISARA' von *IBS Precision Engineering* [7]. Die gemessene Linearitätsabweichung in Antastrichtung beträgt für eine Auslenkung der Tastkugel von $10\ \mu\text{m}$ weniger als $0.12\ \mu\text{m}$ bzw. $1.2\ \%$. Die maximale Antastabweichung (MPE_P gemäss [8]) über 541 Antastpunkte an einer Referenzkugel mit einer Formabweichung von lediglich $0.02\ \mu\text{m}$ beträgt $0.68\ \mu\text{m} \pm 0.01\ \mu\text{m}$ Spanne über drei Messungen. In Bild 6 sind die gemessenen Abweichungen bezüglich der Referenzkugel dargestellt.

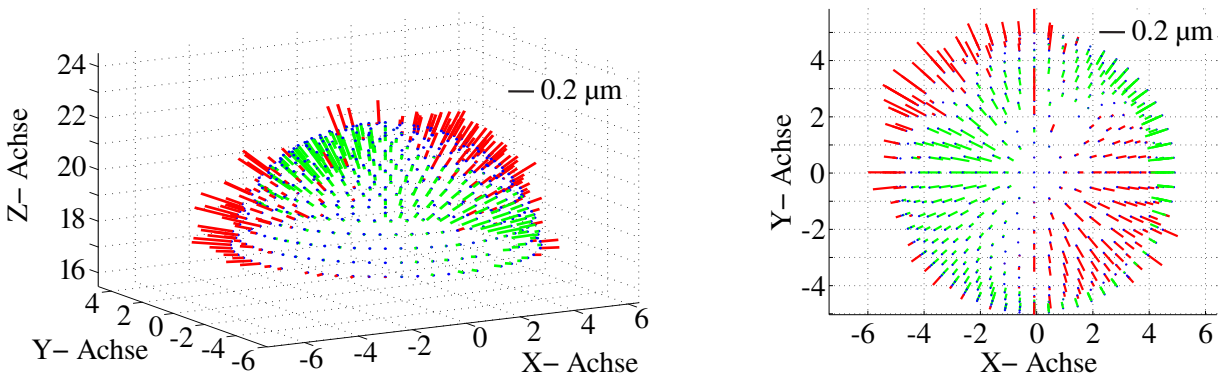


Bild 6: Überprüfung des 3D-Tastsystems auf einem hochgenauen Koordinatenmessgerät durch Messung einer bekannten Referenzkugel. Bild links: Räumliche Darstellung der gemessenen Abweichungen. Bild rechts: Darstellung der gemessenen Abweichungen in der XY-Ebene. Rot: von der Referenzkugel wegweisende Abweichungen. Grün: in die Referenzkugel hineinweisende Abweichungen.

Die mittlere Wiederholbarkeit in den einzelnen Messpunkten über drei Wiederholungsmessungen an der Referenzkugel beträgt $0.01\ \mu\text{m}$, siehe Bild 7.

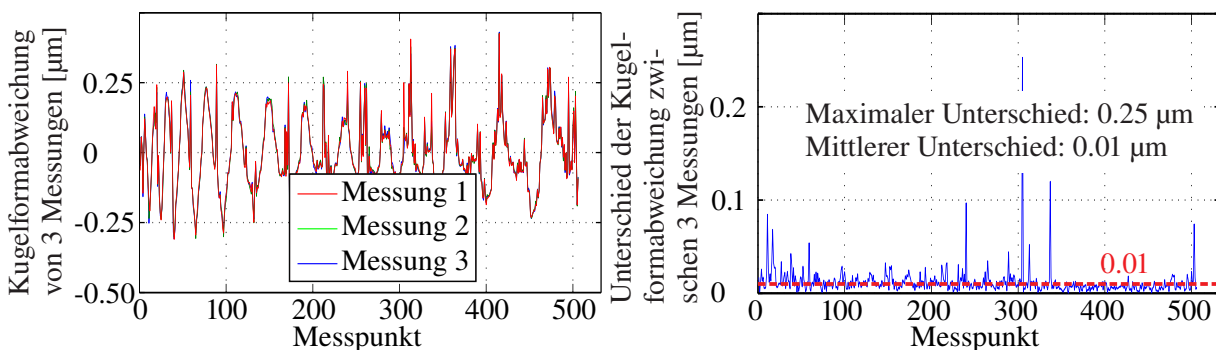


Bild 7: Überprüfung der Wiederholbarkeit in den einzelnen Messpunkten (insgesamt 506 Messpunkte). Bild links: Gemessene Formabweichungen an einer Referenzkugel für drei aufeinanderfolgende Messungen. Bild rechts: Maximaler Unterschied der gemessenen Formabweichungen zwischen den drei Messungen in den einzelnen Messpunkten.

Dabei wird der maximale Unterschied in den einzelnen Messpunkten für drei aufeinanderfolgende Messungen bestimmt und dieser über insgesamt 506 Messpunkte gemittelt. Der maximale Unterschied beträgt $0.25 \mu m$ und ist vermutlich auf Verschmutzungen wie Staub während der Messungen zurückzuführen, da es sich lediglich um einzelne Ausreisser handelt. Aufgrund der guten Wiederholbarkeit des Tastsystems in einzelnen Antastpunkten besteht die Möglichkeit, die Antastabweichungen zu kompensieren und somit die MPE_p deutlich zu reduzieren.

Die Robustheit des Tastsystems gegenüber Kollisionen wird mit einer erzwungenen Kollision untersucht, bei welcher die Tastkugel um $400 \mu m$ ausgelenkt wird, so dass die Messplatte an allen drei Sensoren anliegt. Die Referenzkugel wird vor der erzwungenen Kollision vermessen und nach der Kollision. Die MPE_p vor der Kollision beträgt $0.60 \mu m$, nach der Kollision $0.55 \mu m$ und ist somit nicht wesentlich durch die Kollision beeinflusst. Die Wiederholbarkeit in den einzelnen Messpunkten beträgt mit der erzwungenen Kollision $0.02 \mu m$, ohne die erzwungene Kollision beträgt sie $0.01 \mu m$.

Der Einfluss der Umgebungsbedingungen (Environmental Variation Error gemäss [9]) wird in einem klimatisierten, vibrationsisolierten Reinraum der ISO-Klasse 7 überprüft [10]. Die Temperatur ist auf $20^\circ C \pm 0.25^\circ C$ geregelt und ändert nicht mehr als $0.1^\circ C$ pro Stunde. Dies sind sehr gute Umgebungsbedingungen für das KMG, um Mikro-Bauteile zu überprüfen. Während der Messung ist die Tastkugel mit einem Zerodur-Werkstück in Kontakt. Die gemessenen Verlagerungen der Tastkugel sind in Bild 8 dargestellt. Die grösste Verlagerung der Tastkugel von $0.54 \mu m$ tritt in Z-Richtung auf, welche mit der in der Nähe gemessenen Temperaturänderung von $0.31^\circ C$ und den thermischen Ausdehnungskoeffizienten der Tasterhaltung korreliert:

$$\begin{aligned}
 \Delta L &= (\alpha_{Tastsystem} - \alpha_{KMG}) L \Delta T & (1) \\
 &= (22 \cdot 10^{-6} - 2.6 \cdot 10^{-6}) \frac{1}{K} 0.1 m 0.31 K \\
 &= 0.6 \mu m
 \end{aligned}$$

mit:

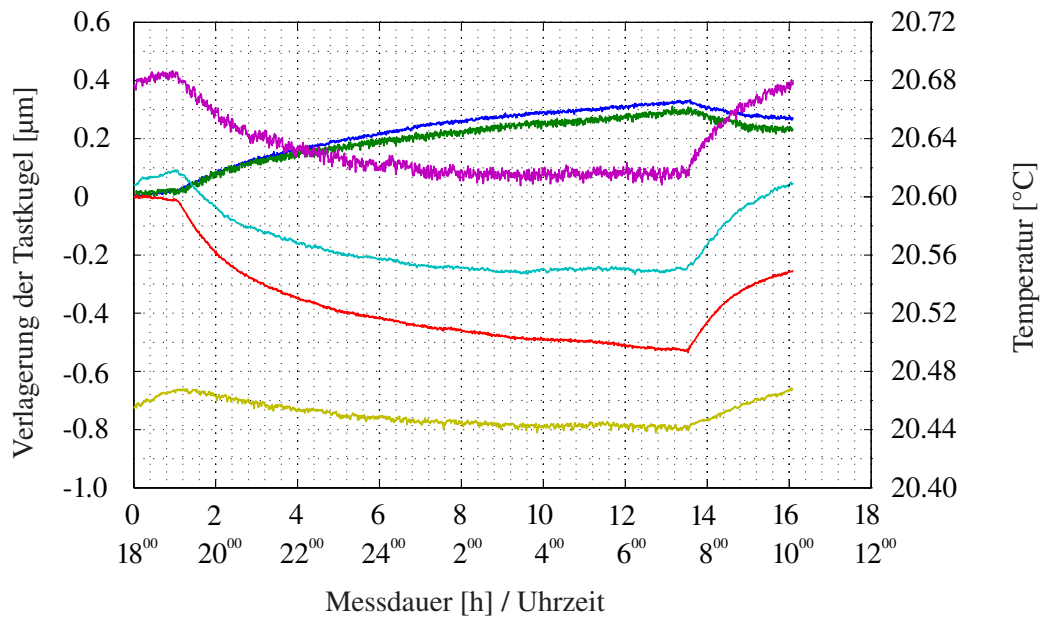
- L Länge von der Aufhängung des Tastsystems am KMG bis zur Tastkugel ($L = 0.1 \text{ m}$);
- ΔL Längenänderung aufgrund thermischer Ausdehnung;
- ΔT Temperaturänderung ($\Delta T = 0.31 \text{ K}$);
- α_{KMG} Thermischer Ausdehnungskoeffizient des Messrahmens ('metrology frame') des KMG (Material: Siliziumkarbid, $\alpha_{KMG} = 2.6 \cdot 10^{-6} \frac{1}{K}$);
- $\alpha_{Tastsystem}$ Thermischer Ausdehnungskoeffizient der Halterung des Tastsystems (Material: Aluminium, $\alpha_{Tastsystem} = 22 \cdot 10^{-6} \frac{1}{K}$).

Durch Verwendung eines anderen Material für die Halterung des Tastsystems kann der Einfluss von Temperaturänderungen deutlich reduziert werden: entweder sollte Material mit minimaler thermischer Ausdehnung verwendet werden wie beispielsweise Zerodur oder Invar, oder die Halterung (siehe Bild 4) sollte aus einem Material mit demselben thermischen Ausdehnungskoeffizienten wie entsprechende Strukturteile des KMG sein.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Ein 3D-Tastsystem für Mikro-Bauteile mit folgenden Eigenschaften wurde realisiert:

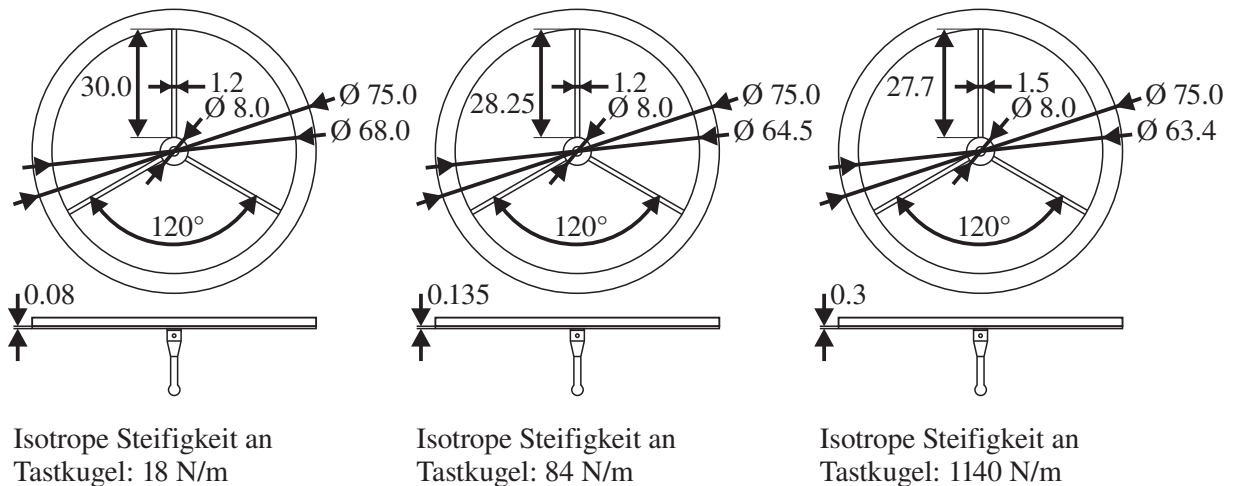
- Isotrope Steifigkeit an der Tastkugel: $84 \frac{N}{m} \pm 25 \frac{N}{m}$;
- Messbereich: $> \pm 100 \mu m$;
- Linearitätsfehler in Antastrichtung über $10 \mu m$ Tastkugelauslenkung: $< 0.12 \mu m$;
- MPE_p: $< 0.68 \mu m$;
- Mittlere Wiederholbarkeit (506 Messpunkte an Referenzkugel): $0.01 \mu m$;
- Mittlere Wiederholbarkeit nach erzwungener Kollision: $0.02 \mu m$;
- Auswechselbarer Taststift;
- Einfache, kostengünstige Herstellung der einzelnen Komponenten aus Standardmaterial sowie einfache Montage;



- Maximale Verlagerung in X: 0.33 µm
- Maximale Verlagerung in Y: 0.31 µm
- Maximale Verlagerung in Z: 0.54 µm
- Maximale Temperaturänderung am Laserinterferometer der X-Achse: 0.07°C
- Maximale Temperaturänderung am Laserinterferometer der Y-Achse: 0.31°C
- Maximale Temperaturänderung am Laserinterferometer der Z-Achse: 0.03°C

Bild 8: Überprüfung des Einflusses der Umgebungsbedingungen auf das 3D-Tastsystem.

- Definierte Auslegung des Tastsystems basierend auf FEM-Berechnungen, so dass das Messprinzip an spezifische Anwendungen zwischen $18 \frac{N}{m}$ und $1140 \frac{N}{m}$ bei gleichen Aussenabmessungen angepasst werden kann, beispielsweise für (Mikro-) KMG oder Werkzeugmaschinen, siehe Bild 9.



Isotrope Steifigkeit an
Tastkugel: 18 N/m

Isotrope Steifigkeit an
Tastkugel: 84 N/m

Isotrope Steifigkeit an
Tastkugel: 1140 N/m

Bild 9: Verschiedene Geometrien der Festkörpergelenke zur Anpassung der Steifigkeiten an der Tastkugel an unterschiedliche Einsatzgebiete des Tastsystems.

Mittels einer Sensitivitätsanalyse, welche bereits für die Auswahl der verwendeten Sensoren und deren Anordnung eingesetzt wird, können der Einfluss der Sensoren und deren Anordnung auf die Messunsicherheit an der Tastkugel bestimmt werden.

Eine numerische Kompensation der Antastabweichungen (MPE_P) wird ermöglicht aufgrund der guten Wiederholbarkeit in den einzelnen Messpunkten von $0.01 \mu m$. Damit sollte die MPE_P von momentan $0.68 \mu m$ deutlich reduziert werden können, schätzungsweise auf die doppelte Wiederholbarkeit in den einzelnen Messpunkten, also auf $0.02 \mu m$.

Literatur

- [1] T. Masuzawa, “State of the Art of Micromachining”, *CIRP Annals - Manufacturing Technology* **49**(2), S. 473–488, 2000.
- [2] D. Dornfeld, S. Min und Y. Takeuchi, “Recent advances in mechanical micromachining”, *CIRP Annals - Manufacturing Technology* **55**(2), S. 745 – 768, 2006.
- [3] A. Weckenmann, T. Estler, G. Peggs und D. McMurtry, “Probing systems in dimensional metrology”, *CIRP Annals - Manufacturing Technology* **53**(2), S. 657–684, 2004.
- [4] T. Liebrich, *3D-Probing System for Micro-Components*. PhD thesis, ETH Zürich, 2012.
- [5] T. Liebrich und W. Knapp, “Improvements and experimental validation of a 3d-probing system for micro-components”, *CIRP Annals - Manufacturing Technology* **61**(1), S. 475–478, 2012.
- [6] T. Liebrich und W. Knapp, “New concept of a 3d-probing system for micro-components”, *CIRP Annals - Manufacturing Technology* **59**(1), S. 513–516, 2010.
- [7] IBS Precision Engineering, “Isara 400”. www.ibspe.com, IBS Precision Engineering B.V. Esp 201 5633 AD Eindhoven The Netherlands, Juni 2011.
- [8] “ISO 10360-1:2000 geometrical product specifications (gps) - acceptance and reverification tests for coordinate measuring machines (cmm) - part 1: Vocabulary”. Geneva, Switzerland, 2000.
- [9] “ISO 230-3:2007 test code for machine tools - part 3: Determination of thermal effects”. Geneva, Switzerland, 2007.
- [10] “ISO 14644-1:1999 cleanrooms and associated controlled environments - part 1: Classification of air cleanliness”. Geneva, Switzerland, 1999.