Florian Fern*, Ralf Schienbein, Roland Füßl, René Theska, Michael Kühnel, Laura Weidenfeller und Eberhard Manske

In-situ-Messung von Bewegungsabweichungen serieller Rotationsachsen zur Anwendung in Nanomessmaschinen

In situ error measurement of serial rotational devices for the application in nano coordinate measuring machines

DOI 10.1515/teme-2019-0040

Zusammenfassung: Dieses Paper zeigt einen möglichen Aufbau zur in situ Messung der Positionierabweichung von seriell angeordneten Rotationseinheiten mit einem konstanten, gemeinsamen Momentanpol. Mit Hilfe dieses Aufbaus kann die Position des letzten Gliedes der kinematischen Kette in allen drei Raumachsen gemessen werden. Dazu wird der Abstand zu einer hemisphärischen Referenzfläche mit drei mitbewegten kartesisch angeordneten Fabry-Pérot-Interferometern gemessen. Diese Interferometer werden hinsichtlich ihrer Eignung zur Messung auf einer gekrümmten Referenzfläche untersucht. Sie zeigen eine periodische Nichtlinearität von ± 10 nm und eine Positionswiederholbarkeit mit einer Standardabweichung von unter 1.6 nm.

Schlüsselwörter: Nanomesstechnik, DOF 5, Interferometrie, In-situ-Messung, Rotations-Kinematik.

Abstract: This paper shows a possible setup for an in situ measurement of the position error of serial rotational devices with constant instant centre of rotation. With the help of this setup the position of the last element in the kinematic chain can be measured in all three dimensions. Therefore the distance to a hemispherical reference area is measured by three Fabry-Pérot interferometers which are attached to the last element of the kinematic chain. Those interferometers are analysed concerning their capability

to measure on a curved reference surface. They show a periodic nonlinearity of ± 10 nm and a standard deviation of the position repeatability of 1.6 nm.

Keywords: Nanomeasurement, DOF 5, Interferometry, In situ measurement, rotational kinematics.

1 Einleitung

Die Messung auf stark gekrümmten, asphärischen oder frei geformten Oberflächen ist immer noch eine Herausforderung in der Messtechnik. Konventionelle, kartesische Nano-Koordinatenmessmaschinen sind je nach Sensor beschränkt in ihren Möglichkeiten zur Messung auf solchen Oberflächen. Aufbauten mit einem erhöhten Freiheitsgrad (DOF=5), der eine optimale Ausrichtung des verwendeten Sensors zur Oberfläche ermöglicht, zeigen sehr gute Messergebnisse auf anspruchsvollen Oberflächen [2, 5, 7]. Eine Neigung des Sensors zur Probe eröffnet neue Möglichkeiten der Messung und es kann beispielsweise die Seitenwandrauheit nach einem lithografischen Ätzprozess untersucht werden [4].

Die mehrachsigen Nano-Koordinatenmessmaschinen mit den niedrigsten erreichbaren Unsicherheiten folgen für die translatorischen Bewegungen in allen Raumachsen strikt dem Abbe-Komparatorprinzip. Je nach vorwiegender Messaufgabe wird das Komparatorprinzip für deren Rotationsachsen, bzw. für den zugehörigen Antastpunkt nicht vollständig eingehalten [2, 5].

Dieser Artikel zeigt die Entwicklung einer Erweiterung einer kartesischen Nano-Koordinatenmessmaschine um zwei Rotationsachsen, deren Führungsabweichungen in allen drei Raumrichtungen in situ gemessen werden. Diese Erweiterung erlaubt eine orthogonale Ausrichtung des Werkzeugs zur Probenoberfläche. Dabei wird das Abbe-

*Korrespondenzautor: Florian Fern, Institut für Prozessmess- und Sensortechnik, Technische Universität Ilmenau, Gustav-Kirchhoff-Str. 1, 98693 Ilmenau, E-Mail: florian.fern@tu-ilmenau.de

Ralf Schienbein, René Theska, Fachgebiet Feinwerktechnik, Technische Universität Ilmenau, Gustav-Kirchhoff-Platz 2, 98693 Ilmenau

Roland Füßl, Michael Kühnel, Laura Weidenfeller, Eberhard Manske, Institut für Prozessmess- und Sensortechnik, Technische Universität Ilmenau, Gustav-Kirchhoff-Str. 1, 98693 Ilmenau,

Prinzip für alle Translations- und Rotationsachsen strikt eingehalten.

2 Stand der Technik

2.1 Nanomessmaschine NMM-1

Die Nanomessmaschine (NMM-1) arbeitet im *sample-scanning-mode*. Dabei wird die Probe relativ zu einem ortsfesten Sensor auf einer x-, y-, z-Plattform in einem Arbeitsbereich von $25\text{ mm} \times 25\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ bewegt. Mit drei auf dem He-Ne-Laser basierenden Michelson Interferometern wird die Position mit einer Auflösung von 0.016 nm in allen drei Raumrichtungen gemessen und geregelt. Die Messstrahlen der Interferometer kreuzen sich rechtwinklig im Antastpunkt des Sensors (Abbe-Punkt). Auf der Plattform selber ist eine 3D Raumspiegelecke angebracht, deren verspiegelte Außenseiten als Messreflektoren für die Interferometer dienen [3].

2.2 Rotations-Kinematik

Auf Grund der existierenden Grundstruktur der NMM-1 ist eine Rotation des Werkzeugs zielführend. Die dazu notwendige kinematische Struktur wurde bereits in [6] dargestellt (siehe Abbildung 1). Die Anordnung erlaubt die Rotation um zwei Rotationsachsen, die sich senkrecht im Antastpunkt des Tools, dem *Tool Center Point* (TCP), schneiden. In Kugelkoordinaten erlaubt die Kinematik eine Verkippung des Tools um den Azimutwinkel $\varphi = 90^\circ$ und den Polarwinkel $\Theta = 360^\circ$. Die Rotationsachsen werden durch einen Rotationstisch der eine kontinuierliche Drehung um die z-Achse ermöglicht und einen seriell dazu angeordneten Goniometertisch (Goniometer), der einen Verstellbereich von $\pm 45^\circ$ zulässt, realisiert. Durch diese Anordnung erfährt der TCP keine systematische Verlagerung bei einer Änderung der Ausrichtung. Da somit keine Kompensationsbewegungen durch die Spiegelecke notwendig ist, wird der Messbereich und die bisherige Dynamik der NMM-1 nicht eingeschränkt.

Der TCP erfährt jedoch durch Führungsabweichungen der verwendeten Rotationssysteme eine Verlagerung. Die Wiederholbarkeit der Verlagerung wird mit einer Kugellinse der Brechzahl $n = 2$ an der TCP-Position, deren Position mit drei Interferometern in allen drei Raumrichtungen simultan gemessen wird, bestimmt. Die Messungen zeigen, bereinigt von Drift als *best-case* Abschätzung unter optimalen Bedingungen, eine Standardabweichung der

Abb. 1: Rotationskinematik zur senkrechten Ausrichtung des Sensors zur Probenoberfläche im Bereich von $\varphi = 90^\circ$ und $\Theta = 360^\circ$, bestehend aus einer seriellen Anordnung von zwei Rotationsachsen mit gemeinsamen Schnittpunkt im *Tool Center Point*.

Wiederholbarkeit von 100 nm in x- und y-Richtung und von 40 nm in z-Richtung [1].

3 In-situ-Messsystem

Basierend auf den Ergebnissen der Wiederholbarkeitsmessung ist eine in-situ-Messung der Antastposition zum Erreichen von Unsicherheiten auf dem Niveau anderer Nanomessmaschinen unabdingbar. Bisherige Maschinen messen, je nach Anordnung der Achsen, die Abweichungen ihrer Rotationseinheiten seriell zu den translatorischen Bewegungen. [2, 5]. Es hat sich jedoch bei den kartesischen Nano Koordinatenmessmaschinen als sinnvoll herausgestellt, die Bewegung des Objektes an der letzten Stelle der kinematischen Kette zu messen. Damit kann die Zahl der notwendigen Messgrößen und somit auch die Unsicherheit reduziert werden. Da der Antastpunkt auf Grund der gewählten Kinematik keine Verlagerung erfährt, ist der Aufbau symmetrisch um den Antastpunkt. Die Sensoren des in-situ-Messsystems sind starr mit dem letzten Element der kinematischen Kette verbunden und messen den Abstand zu der hemisphärischen Referenzfläche (siehe Abbildung 2 oberer Teil). Dabei schneiden sich die Messachsen der Sensoren virtuell (rückwärtige Verlängerung der Messrichtung) im TCP. Sie sind als Nullpunktindikator zu sehen, da sie bei einer idealen Rotation und einer idealen Referenzfläche keine Distanzänderung messen.

3.1 Sensoren und Referenzfläche

Zur Messung des Abstandes kommen kommerzielle, faserkoppelte Fabry-Pérot Interferometer zum Einsatz. Bei

einem Fabry-Perot Interferometer dient die Austrittsfläche der Faser als Referenzfläche des Interferometers. Ein Teil des Lichtes wird an dieser Grenzfläche wieder zurück in die Faser reflektiert. Der austretende Anteil wird durch eine Optik mit der Brennweite $f = 40 \text{ mm}$ auf die Referenzfläche fokussiert und von dort in die Faser zurück reflektiert. Es kommt zwischen den beiden Anteilen des Lichtes zur Interferenz. Als Lichtquelle kommt eine Laserdiode mit der Wellenlänge von $\lambda_f = 1530 \text{ nm}$ zum Einsatz.

Es werden drei Fabry-Pérot Interferometer verwendet, um die Position des TCP in allen drei Raumrichtungen zu messen. Die Messachsen der Interferometer spannen dabei ein kartesisches Koordinatensystem auf. Grundsätzlich kann mit diesem Aufbau im vollständigen Bewegungsbereich des Rotationssystems die Position des TCP bestimmt werden. Auf Grund von Beschränkungen in der Zugänglichkeit, von möglichen Kollisionen und Gegebenheiten der genutzten Maschine, wird der tatsächliche Messbereich auf $\varphi = 60^\circ$ und $\Theta = 360^\circ$ eingeschränkt.

Diese Einschränkungen ermöglichen unter Variation der Lage des in situ Koordinatensystems eine auf den Anwendungsfall optimierte Auswahl der Referenzsphäre. Das in-situ-Koordinatensystem kann durch Drehung des Maschinenkoordinatensystems um 45° um die z-Achse und durch eine Verkipfung von 55° um die ursprüngliche x-Achse berechnet werden. Dabei entsprechen die transformierten Achsen x' , y' , z' den Messachsen der Fabry-Pérot Interferometer F_1 , F_2 und F_3 . Die auf der Oberfläche der Referenzsphäre überstrichenen Bereiche sind in Abbildung 3 dargestellt.

Für die Interferenz steht bei einem Fabry-Pérot Interferometer nur die Intensität des an der Grenzfläche der Faser reflektierten Lichts zur Verfügung. Als Referenzfläche wird eine unverspiegelte Glasfläche verwendet, somit

Abb. 2: Prinzip des Aufbaus zur in-situ-Messung der Rotationsabweichung und zur in-situ-Kalibrierung der Referenzfläche für das Werkzeug Rotationssystem der NMM-1. Zur vereinfachten Darstellung sind nur zwei der drei Fabry-Pérot-Interferometer (Fabry-Pérot IF) dargestellt.

Abb. 3: Referenzsphäre für das in situ Messsystem. Dargestellt sind die von den Fabry-Pérot-Interferometern überstrichenen Bereiche der Referenzfläche.

erreichen beide Lichtsignale die gleiche Intensität. Andernfalls müsste die Intensität des im Messarm reflektierten Lichtes zusätzlich durch Blenden, Nd Filter, oder durch gezielte Defokussierung reduziert werden [8].

3.2 Kalibrierung der Oberfläche

Die Referenzsphäre ist aus Quarzglas und hat einen Innendurchmesser von 400 mm. Um die geforderten Unsicherheiten zu erreichen muss die Referenzfläche kalibriert werden. Da es sich um eine sphärische Form handelt, ist die Messung mit einem Fizeau-Interferometer grundsätzlich möglich. Wie in [9] für die Spiegelecken gezeigt, hat die Einbausituation der Referenzfläche einen großen Einfluss auf die Formabweichung. Daher wird die Referenzfläche im eingebauten Zustand auf der NMM-1 kalibriert.

Zur in situ Kalibrierung der Referenzfläche wird eine Kugellinse mit $n = 2$ anstelle des Tools in den Aufbau integriert. Dabei entspricht der Kugelmittelpunkt dem TCP. Durch die x-, y- und z-Interferometer der NMM-1 kann nach dem Ausbau der Spiegelecke, die tatsächliche Verlagerung des Referenzmesssystems bestimmt werden. Gleichzeitig wird die Distanz zur Referenzfläche durch die Fabry-Pérot-Interferometer gemessen. Aus der Differenz kann die Topologie der Referenzfläche ermittelt werden.

4 Untersuchung der Fabry-Pérot-Interferometer

Die verwendeten Fabry-Pérot-Interferometer werden in einem separaten Aufbau hinsichtlich ihres Verhaltens bei der Messung auf einer gekrümmten Oberfläche untersucht. Ein

Abb. 4: Messaufbau zur Untersuchung der Eigenschaften des Fabry-Pérot-Interferometers auf einer gekrümmten Oberfläche mit Hilfe der NMM-1. 1 - Fabry-Pérot-Interferometer ($f=40$), 2- Spiegelecke NMM-1, 3- unbeschichteter Spiegel $R = 203.4$ mm.

unverspiegelter, sphärischer Hohlspiegel mit der Brennweite $f = 101.6$ mm, $r = 203.2$ mm wird auf der Spiegelecke der Nanomessmaschine relativ zu dem Fabry-Pérot-Interferometer bewegt (siehe Abbildung 4). Dabei wird die Kennlinie entlang der Messachse aufgezeichnet.

4.1 Linearitätsabweichung

Durch Bildung der Differenz zwischen den Werten des z-Interferometers der NMM-1 und den Werten des Fabry-Pérot-Interferometers wird die Kennlinienabweichung über den Bewegungsbereich von $100\ \mu\text{m}$ bestimmt.

$$D = Z_{NMM-1} - Z_{\text{Fabry-Pérot}}$$

Abb. 5: Kennlinienabweichung zwischen dem Z-Interferometer der NMM-1 und dem Fabry-Pérot-Interferometer über einen Bewegungsbereich entlang der z-Achse von $100\ \mu\text{m}$.

In dem Bewegungsbereich treten vorwiegend periodische Abweichungen der Kennlinie auf. Die Abweichungen haben eine maximale Amplitude von $10\ \text{nm}$. Die periodischen

Abb. 6: FFT der Differenz zwischen NMM-1 z-Interferometer und Fabry-Pérot-Interferometer mit einer örtlichen Abtastung von $20\ \text{nm}$ über einen Messbereich von $100\ \mu\text{m}$. Die Peaks im Spektrum entsprechen Bruchteilen der verwendeten Laserfrequenzen von $\lambda_f = 1530\ \text{nm}$ und $\lambda_{\text{He-Ne}} = 632.8\ \text{nm}$.

Abweichungen können im Frequenzbereich genauer untersucht werden (siehe Abbildung 6). Das in $20\ \text{nm}$ Schritten abgetastete Messsignal wird mittels FFT in seine Frequenzanteile zerlegt. Die Peaks bei $763.4\ \text{nm}$, $383.1\ \text{nm}$ und $255.0\ \text{nm}$ sind dabei auf das Fabry-Pérot-Interferometer zurückzuführen, da diese Peaks Vielfachen der verwendeten Wellenlänge des Interferometers $\lambda_f = 1530\ \text{nm}$ entsprechen.

$$763.4\ \text{nm} = 0,498 \cdot \lambda_f \approx \frac{\lambda_f}{2}$$

$$383.1\ \text{nm} = 0,250 \cdot \lambda_f \approx \frac{\lambda_f}{4}$$

$$255.0\ \text{nm} = 0,166 \cdot \lambda_f \approx \frac{\lambda_f}{6}$$

Die zu $\lambda_f/2$ und $\lambda_f/4$ periodischen Anteile sind auf optische Effekte im Strahlengang zurückzuführen, wohingegen die $\lambda_f/6$ periodische Nichtlinearität durch die Demodulierung des Interferometersignals entsteht [8]. Die Ausschläge bei $316.5\ \text{nm}$ und $158.2\ \text{nm}$ sind die Nichtlinearitäten des He-Ne Michelson Interferometers der NMM-1, deren Amplitude deutlich unter $1\ \text{nm}$ liegt.

4.2 Zufällige Bewegung

Bei der Verwendung der Fabry-Pérot-Interferometer als in situ Messsystem gibt es neben der Bewegung entlang der optischen Achse auch zufällige Bewegungen in allen Raumrichtungen. Um diese zufälligen Bewegungen und die damit verbundenen Fehlausrichtungen abzubilden wird die Probe nach einem zufälligen Muster in einem großen Bereich relativ zum Sensor bewegt. Das zufällige Muster

wird gewählt um systematische Effekte bei der Messung zu vermeiden und um die späteren zufälligen Abweichungen des Gesamtaufbaus zuverlässig abzubilden. Dabei wird das Punktmuster zehn Mal wiederholt und die Standardabweichung zwischen den einzelnen Punkten des Punktemusters bestimmt (siehe Abbildung 7). Die Standardabweichung

Abb. 7: Abweichung und Wiederholbarkeit der Abweichung zwischen Fabry-Pérot-Interferometer und z-Interferometer der NMM-1 für 10 Wiederholungen von 50 zufällig gewählten Datenpunkten in einem Bereich von 1 mm × 1 mm × 0.2 mm, sowie die Abweichung nach Abzug der geometrischen Sollform des Hohlspiegels.

der Einzelpunkte liegt zwischen 0.4 nm und 1.6 nm. Da sich die Probe um 1 mm relativ zum Scheitelpunkt der Probe bewegt hat, wird auch die Form des verwendeten Hohlspiegels erfasst. Nach einer Korrektur der Abweichung durch die Sollform des Hohlspiegels:

$$D_s = Z(x, y) - S(x, y, r = 203.2 \text{ mm})$$

liegt die verbleibende Differenz über alle 50 Messpunkte in einem Bereich von ±40 nm und damit im Bereich der gemessenen Nichtlinearitäten.

5 Zusammenfassung

Dieser Artikel zeigt ein in-situ-Messsystem zur Messung von Bewegungsabweichungen serieller Rotationsachsen zur Erweiterung der bestehenden NMM-1. Unter Einhaltung des Abbe-Komparatorprinzips wird dabei der Abstand zwischen dem bewegten Tool und einer hemisphärischen Referenzfläche durch drei Fabry-Pérot-Interferometer gemessen. Diese Interferometer werden in einem separaten Testaufbau hinsichtlich ihrer Messeigenschaften auf gekrümmten Flächen untersucht. Sie zeigen eine periodische Nichtlinearität von ±10 nm und eine Wiederholbarkeit der Einzelpunkte von $\sigma \leq 1.6 \text{ nm}$

Danksagung: Die vorgestellten Arbeiten wurden von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen des Graduiertenkollegs „Spitzen- und laserbasierte 3D-Nanofabrikation in ausgedehnten, makroskopischen Arbeitsbereichen“ (GRK 2182) an der Technischen Universität Ilmenau gefördert.

Literatur

- [1] F. Fern, R. Schienbein, R. Füßl und R. Theska. Ultra precise motion error measurement of rotation kinematics for the integration in nanomeasuring and nanofabrication machines. *Proceeding 33rd ASPE Annual Meeting*, 2018.
- [2] R. Henselmans, L. A. Cacace, G. Kramer, P. Rosielle und M. Steinbuch. The nanomefos non-contact measurement machine for freeform optics. *Precision Engineering*, 35(4):607–624, 2011. ISSN 01416359. 10.1016/j.precisioneng.2011.04.004.
- [3] G. Jäger, E. Manske, T. Hausotte und H.-J. Büchner. The metrological basis and operation of nanopositioning and nanomeasuring machine nmm-1. *tm - Technisches Messen*, 76(5):524, 2009. ISSN 0171-8096. 10.1524/teme.2009.0960.
- [4] R. Kizu, I. Misumi, A. Hirai, K. Kinoshita und S. Gonda. Development of a metrological atomic force microscope with a tip-tilting mechanism for 3D nanometrology. *Measurement Science and Technology*, 29(7):075005, 2018. ISSN 0957-0233. 10.1088/1361-6501/aabe1a.
- [5] J. Petter und G. Berger. Non-contact profiling for high precision fast asphere topology measurement. In P. H. Lehmann, editor, *Optical Measurement Systems for Industrial Inspection VII*, Proceedings of SPIE, S. 878819. ISBN 9780819496041. 10.1117/12.2020572.
- [6] R. Schienbein, F. Fern, F. Weigert, R. Theska und R. Füßl. The implementation of ultra precision rotations to multiaxial nanofabrication machines: challenges and solution concepts. In D. Billington, editor, *Proceedings of the 18th International Conference of the European Society for Precision Engineering and Nanotechnology*, S. 65–66. euspen, Bedford, UK, 2018. ISBN 978-0-9957751-2-1.
- [7] A. Schuler. *Erweiterung der Einsatzgrenzen von Sensoren für die Mikro- und Nanomesstechnik durch dynamische Sensornachführung unter Anwendung nanometeraufgelöster elektrischer Nahfeldwechselwirkung*. Zugl.: Erlangen, Nürnberg, Univ., Diss., 2013, Band Bd. 29 of *Berichte aus dem Lehrstuhl Qualitätsmanagement und Fertigungsmeßtechnik, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg*. Shaker, Aachen, 2013. ISBN 978-3-8440-2299-5.
- [8] K. Thurner, F. P. Quacquarelli, P.-F. Braun, C. Dal Savio und K. Karrai. Fiber-based distance sensing interferometry. *Applied optics*, 54(10):3051–3063, 2015. 10.1364/AO.54.003051.
- [9] H. Xu. *Hochpräzise Bestimmung der Form- und Orthogonalitätsabweichungen einer Spiegelecke und Untersuchung des Verhaltens unter veränderlichen Umweltbedingungen*. Dissertation, Technische Universität Ilmenau, 2017.