

Heterodynes Interferometer mit vier Strahlen für hochpräzise Längen- und Winkelmessung in Nanopositionier- und Nanomessmaschinen

Guido Straube*, Juan Sebastian Fischer Calderón*, Ingo Ortlepp*, Eberhard Manske*

*Institut für Prozessmess- und Sensortechnik, Technische Universität Ilmenau

<mailto:guido.straube@tu-ilmenau.de>

Um gestiegenen Anforderungen an das Messvolumen von Nanopositionier- und Nanomessmaschinen Rechnung zu tragen, wurde ein neues inverses Konzept entwickelt. Für die hochpräzise Positionierung des Sensorkopfs im Messraum werden dabei vier interferometrische Messachsen für jede Raumrichtung benötigt. Es wird ein Heterodyn-Laserinterferometer für diese Aufgabe vorgestellt sowie Messergebnisse präsentiert.

1 Einführung

Zwei aktuelle Entwicklungen in der Halbleiterproduktion führen zu gesteigerten Anforderungen an Nanomess- und Nanopositioniermaschinen (NPMs); zum einen steigen die Durchmesser der zu prozessierenden Wafer, zum anderen nehmen die Abmessungen der einzelnen Strukturen sowie deren Abstände weiter ab. Typische Beispiele hierfür sind Spiegel für die EUV-Lithographie mit Durchmessern bis 1 m, sowie Gitter für die Gravitationswelleninterferometrie mit Abmessungen bis $1 \times 1 \text{ m}^2$. Die in der Vergangenheit an der TU Ilmenau entwickelten NPMs weisen Bewegungsbereiche von $25 \times 25 \times 5 \text{ mm}^3$ [1], bzw. $200 \times 200 \times 25 \text{ mm}^3$ [2] auf und sind somit nicht für die Vermessung von Bauteilen mit den genannten Abmessungen geeignet. Eine Erweiterung des Messvolumens unter Beibehaltung des bestehenden Konzepts der bewegten Plattform bewirkt, dass die zu bewegende Masse, welche sich aus der Masse des Messobjekts sowie der Plattform zusammensetzt, stark ansteigt. Dies führt zu einem Zielkonflikt hinsichtlich der erreichbaren Dynamik der Bewegung, welche, insbesondere mit dem Hintergrund der vergrößerten zu vermessenden Flächen, gesteigert werden soll, um weiterhin akzeptable Messzeiten gewährleisten zu können. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, wird in [3] eine NPM mit inversem Konzept vorgeschlagen.

2 Inverses Konzept

Im Gegensatz zum bestehenden Prinzip der bewegten Plattform, sind bei einer NPM nach dem inversen Konzept die Spiegel raumfest angeordnet und die Interferometer zur hochpräzisen Bestimmung der Position an einem beweglichen Messkopf angebracht (siehe Abb. 1). Da lediglich der Messkopf mit Interferometern und Tast- bzw. Bearbeitungssystem verfahren werden muss, ist eine hohe Dynamik realisierbar. Weiterhin kann eine Maschine nach dem inversen Konzept beliebig skaliert werden, da die zu bewegende Masse unabhängig vom Messvolumen ist.

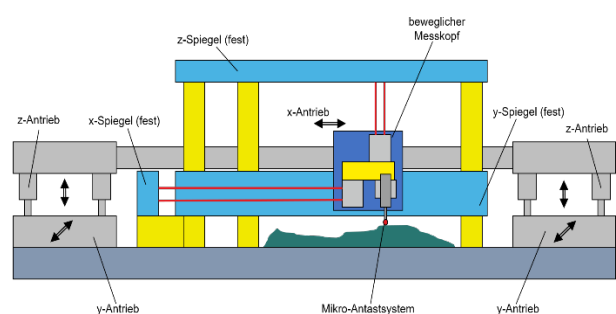


Abb. 1 Prinzip des inversen Konzepts, der Messkopf mit Interferometern und Mikro-Antastsystem wird bewegt, während die Spiegel und das Messobjekt raumfest angeordnet sind [3]

Da die als Referenzsystem dienenden raumfesten Spiegel eine von der ideal ebenen Spiegeloberfläche abweichende Topographie besitzen und eine externe Kalibrierung der Spiegel aufgrund der Abmessungen von bis zu $1 \times 1 \text{ m}^2$ nicht zielführend ist, wird ein in-situ Messverfahren für die Spiegeloberfläche eingesetzt [4]. Die Grundlage hierfür bietet das Traceable Multiple Sensor Verfahren [5, 6], welches Fehlerseparation und somit die Rekonstruktion der Spiegeloberflächen basierend auf in Fahrtrichtung des Messkopfs redundant abgetasteten diskreten Punkten auf der Spiegeloberfläche erlaubt. Da der Messkopf in x-, y- und z-Richtung verfahren wird, sind für jede Raumrichtung mindestens drei Messstrahlen erforderlich. Um diese Anforderung zu gewährleisten, wird ein 4-Strahl-Heterodyn-Interferometer (HIF) entwickelt. Vier Strahlen ermöglichen zusätzlich eine Rekonstruktion der Spiegeltopographie während der diagonalen Fahrt.

3 Vier-Strahl-Heterodyn-Interferometer

Für das 4-Strahl-HIF werden zwei auf die Beatfrequenz stabilisierter He-Ne Laser genutzt [7]. Der Strahlengang und das Prinzip der Auswertung der Interferenzen sind detailliert in [8] beschrieben. Der Strahlengang des 4-Strahl-HIF ist so ausgelegt, dass die beiden heterodynen Frequenzen konsequent voneinander getrennt geführt werden. Dies

ermöglicht geringe verbleibende optische Nichtlinearitäten.

4 Messergebnisse

Zur Evaluierung der verbleibenden optischen Nichtlinearitäten wurden Messungen mit einem minimalen Setup durchgeführt. Dabei wurde nur einer der vier Kanäle ausgewertet. Zur Realisierung der Bewegung des Messspiegels wurde dieser an einen beheizbaren Messingstab montiert und während des Abkühlvorgangs die Längenänderung des Messarms aufgenommen (siehe Abb. 2).

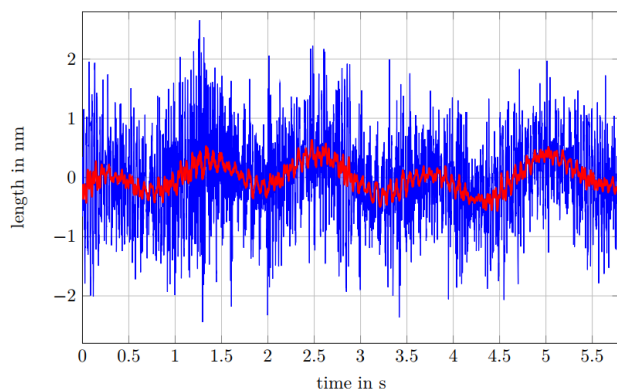


Abb. 2 Messung zur Bestimmung der optischen Nichtlinearitäten; blau: trendkorrigierte Messsignale eines Kanals, rot: mit gleitendem Mittelwertfilter gefilterte Daten

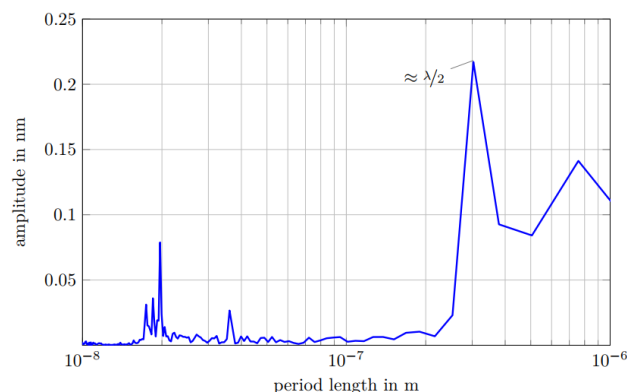


Abb. 3 Fouriertransformation der gefilterten Messdaten

Abb. 3 zeigt die Fouriertransformation der aufgenommenen Messdaten, in welcher ein Maximum bei $\lambda/2$ mit einer Amplitude von 0,22 nm sichtbar wird. Ein kommerzielles Interferometer zeigte bei Vergleichsmessungen Maxima bei $\lambda/4$ von 0,35 nm und bei $\lambda/8$ von 0,55 nm [8]. Demzufolge sind die optischen Nichtlinearitäten des 4-Strahl-HIF um einen Faktor von 2,5 geringer.

Um die Stabilität des Aufbaus des 4-Strahl-HIFs bewerten zu können, wurden zudem Messungen mit zwei Kanälen durchgeführt, welche in Abb. 4 dargestellt sind. Der Aufbau ist dabei nicht mechanisch von der Umgebung entkoppelt, auch wurde keine Korrektur der Änderung der Brechzahl der Umgebung durchgeführt. Über eine Zeit von 600 s wurde eine maximale Abweichung von 23,5 nm gesamt,

sowie eine maximale Differenz zwischen beiden Kanälen von 5,5 nm ermittelt.

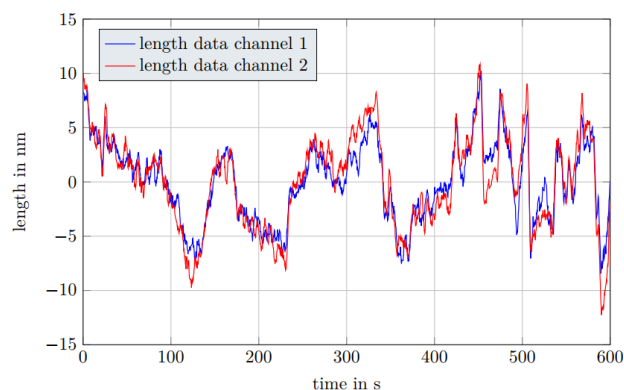


Abb. 4 Messung mit zwei Kanälen über 600 s bei feststehendem Messspiegel

Literatur

- [1] G. Jäger, E. Manske, T. Hausotte, H.-J. Büchner, „Nano Measuring Machine for Zero Abbe Offset Coordinate-measuring“, tm – Technisches Messen – Plattform für Methoden, Systeme und Anwendungen der Messtechnik (67, 7-8), 2000.
- [2] G. Jäger, E. Manske, T. Hausotte, A. Müller, H.-J. Büchner, „Nanopositioning and nanomeasuring machine NPM-200: a new powerful tool for large-range micro- and nanotechnology“, Surface Topography: Metrology and Properties (4.3 034004) 2016.
- [3] I. Ortlepp, E. Manske, R. Füßl, „Dynamic sensor positioning in large measuring volumes by an inverse kinematic concept“, IOP Conf. Series: Journal of Physics (1065.14, 142009), 2018.
- [4] G. Straube, J. S. Fischer Calderón, I. Ortlepp, E. Manske, „Fundamentals of Dynamic Sensor Positioning with Nanoscale Accuracy by an Inverse Kinematic Concept“, SMSI 2020, D6 Inverse Problems in Measuring Technology, 307-308, 2020.
- [5] M. Schulz, C. Elster, „Traceable multiple sensor system for measuring curved surface profiles with high accuracy and high lateral resolution“, Optical Engineering 45(6), 060503, 2006.
- [6] A. Wiegmann, M. Schulz, C. Elster, „Improving the lateral resolution of a multi-sensor profile measurement method by non-equidistant sensor spacing“, Optics Express 18(15), 15807, 2010.
- [7] C. Sternkopf, C. Diethold, U. Gerhardt, J. Wurmus, E. Manske, „Heterodyne interferometer laser source with a pair of two phase locked loop coupled He-Ne lasers by 632.8 nm“, IOP Science Meas. Sci. Technol. 23 074006, 2012.
- [8] G. Straube, J. S. Fischer Calderón, I. Ortlepp, R. Füßl, E. Manske, „A Heterodyne Interferometer with Separated Beam Paths for High-Precision Displacement and Angular Measurements“, Springer Nanomanufacturing and Metrology 4, 200-207, 2021.