

Neue Messstrategie für Präzisionskugeln mit einer fünfachsigigen Messmaschine

Chao Fan, Johannes Belkner, Ingo Ortlepp, Thomas Fröhlich
Institut für Prozessmess- und Sensortechnik, Technische Universität Ilmenau
mailto:chao.fan@tu-ilmenau.de

Eine auf der klassischen 3D-Nanopositioniermaschine NMM-1 aufgebaute fünfachsigige In-situ-Messmaschine, die einen Fokussensor sowie drei Fabry-Pérot-Interferometer integriert, ermöglicht eine erhebliche Erweiterung des Messbereichs bei der berührungslosen Vermessung von Präzisionskugeln.

1 Einführung

Die primäre Herausforderung bei der 3D-Fabrikation auf Freiformoberflächen mittels Ein-Photonen-Lithographie liegt in deren präziser Positionierung. Um den Messbereich der Freiformoberflächen zu erweitern und die Messunsicherheit zu verringern, wurde eine fünfachsigige In-situ-Messmaschine auf Basis einer klassischen 3D-Nanopositioniermaschine NMM-1 [1] entwickelt. Im Vergleich zu den Translationen entlang der x-, y- und z-Achse der NMM-1 verfügt diese fünfachsigige Messmaschine über zwei zusätzliche Freiheitsgrade, eine 360°-Rotation sowie eine 50°-Neigung des Antastensors um das Rotationszentrum. Dadurch wird es ermöglicht, während der Messung stets senkrecht zur Oberfläche des Messobjekts anzutasten. Zurzeit ist ein Fokussensor [2], ein optischer Punktabstandssensor, als Antastensor in dieser erweiterten NMM-1 integriert, der den Abstand zur Objekt Oberfläche berührungslos misst. Relative Höhenänderungen der Objekt Oberfläche führen dazu, dass sich die vom Sensor erfassten reflektierten Lichtstrahlen verändern, wodurch das Profil der Oberfläche beschrieben werden kann. Zur Demonstration des aktuellen Messkonzepts wurde eine Präzisionskugel mit einem Durchmesser von 9 mm in einem Sektorwinkelbereich von etwa $\pm 50^\circ$ mit einer Messgeschwindigkeit zwischen 10 $\mu\text{m/s}$ und 30 $\mu\text{m/s}$ vermessen.

2 Mechanische Konstruktion

Der mechanische Aufbau der fünfachsigigen Messmaschine besteht im Wesentlichen aus drei Hauptkomponenten: der konventionellen Nanopositioniermaschine, dem Rotationsmechanismus mit zugehörigem Tragrahmen sowie dem integrierten In-situ-Referenzsystem (siehe Abb. 1).

Die NMM-1 dient als Basis, wobei ihre Spiegelecke verfahren und mithilfe von drei Laserinterferometern präzise positioniert werden kann. Der Rotationsmechanismus basiert auf einer sphärischen Parallelkinematik [3] und ermöglicht die Rotation (Θ) sowie die Neigung (φ) des integrierten Antastensors.

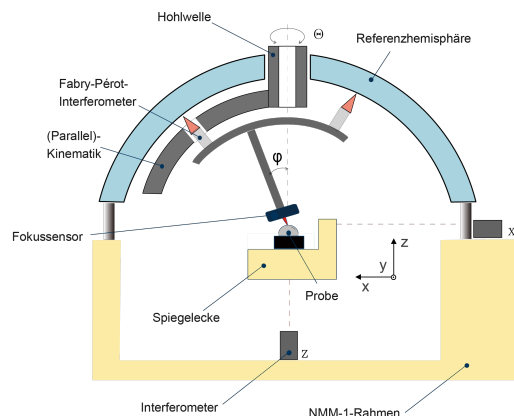


Abb. 1 Technisches Prinzip der fünfachsigigen Messmaschine.

Aufgrund des unvermeidbaren, durch Fertigungs- und Montagetoleranzen verursachten Versatzes sowie der Veränderung des Massenschwerpunkts bei geneigter Mechanik treten systematische und zufällige mechanische Fehler auf, wie beispielsweise eine Exzentrizität zwischen Antastpunkt und Rotationszentrum [3]. Daher stellt das integrierte In-situ-Referenzsystem, bestehend aus drei Fabry-Pérot-Interferometern und einer Referenzhemisphäre aus Quarzglas, ein weiteres zentrales Element dar. Das Prinzip beruht auf der Messung der Abstandsänderungen zwischen dem Antastsensor und der Referenzhemisphäre mithilfe von drei Fabry-Pérot-Interferometern, wodurch die relative Positionsabweichung des Sensors im Raum bei der Messung bestimmt wird. Diese Abweichung wird anschließend dem Koordinatensystem der NMM-1 zugeordnet, sodass mechanische Fehler während der Messung vom System kompensiert werden können.

3 Ergebnisse der Messungen

Derzeit wird diese Messmaschine einer ersten Testphase unterzogen, wobei als Probe eine Metallpräzisionskugel mit einem Durchmesser von 9 mm und der Präzisionsklasse 3 verwendet wird. Während des Messvorgangs blieb der Fokussensor zunächst unbeweglich, während die Spiegelecke mit der darauf befestigten Probe mit konstanter

Geschwindigkeit verfahren wurde. Das Messergebnis ist in der Abb. 2 dargestellt. Der dabei gemessene Sektorwinkel beträgt ungefähr $\pm 5^\circ$.

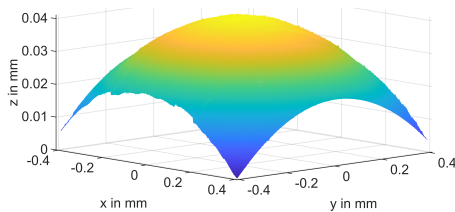


Abb. 2 Gemessenes Oberflächenprofil der Präzisionskugel, y-Achsen-Scan mit $30 \mu\text{m/s}$, Messschritt 100 nm und wiederholte Messungen alle $2 \mu\text{m}$ entlang der x-Achse.

Wird der Fokussensor jedoch nicht geneigt, stößt der messbare Bereich der Kugeloberfläche an seine Grenzen. Wird dieser Grenzwert überschritten, geht das Sensorsignal verloren, wie in Abb. 3 dargestellt. Dies liegt daran, dass der Fokussensor bei einem zu großen Neigungswinkel der Kugeloberfläche das von dieser reflektierte Licht nicht mehr detektieren kann. Zugleich wird diese Messbereichsgrenze auch von der Messgeschwindigkeit und der Messrichtung beeinflusst, was auf die Regelung des Systems sowie auf die konstruktiven Eigenschaften des Fokussensors zurückzuführen ist. Je höher die Messgeschwindigkeit ist, desto kleiner wird der messbare Bereich. Bei einer Verfahrensgeschwindigkeit der Spiegelecke von $10 \mu\text{m/s}$ beträgt der maximal messbare Sektorwinkel etwa $\pm 22^\circ$.

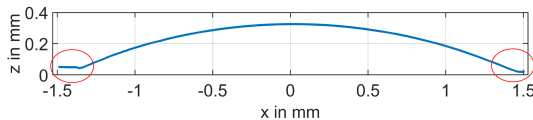


Abb. 3 Signalverlust des Fokussensors bei einer großflächigen Messung.

Um den messbaren Bereich der Kugeloberfläche zu vergrößern, muss der Fokussensor geneigt werden, sodass er die zu vermessende Kugeloberfläche senkrecht vermessen kann. Die derzeit verfolgte Strategie besteht darin, die Messergebnisse aus verschiedenen Messbereichen miteinander zu verknüpfen. Insgesamt wurden fünf Messungen auf der Kugeloberfläche durchgeführt, wobei jeweils in Kreuzform entlang der x- und y-Achse gemessen wurde (siehe Abb. 4). Die Exzentrizität im System beträgt praktisch ungefähr $460 \mu\text{m}$ (siehe Abb. 5). Die bei jeder Messung gemessenen Daten wurden mithilfe der Methode der kleinsten Quadrate genutzt, um fünf Kugelmittelpunkte zu bestimmen. Diese Mittelpunkte dienten anschließend als Referenz zur Korrektur der mechanischen Fehler. Der messbare Sektorwinkel erreicht in diesem Fall etwa $\pm 50^\circ$.

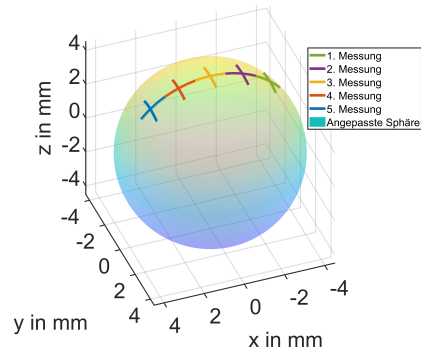


Abb. 4 Position der fünf gemessenen Bereiche auf einer Präzisionskugel.

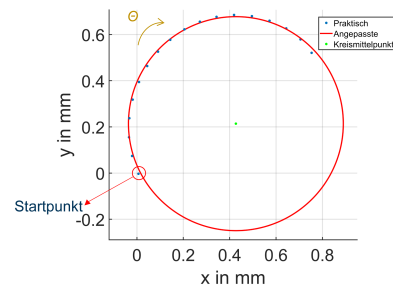


Abb. 5 Exzentrizität des Rotationszentrums: Drehung des Fokussensors um 170° , Sensorpositionen (blau) alle 10° , angepasster Kreis (rot) und dessen Mittelpunkt (grün).

4 Zusammenfassung und Ausblick

Der messbare Bereich der Kugeloberfläche kann mit dieser fünffachen Messmaschine vergrößert werden. Zukünftig soll das Referenzsystem weiter programmiert werden, sodass mechanische Fehler vom System selbstständig kompensiert werden können. Darüber hinaus werden die Messergebnisse mit denen der NMM-1 verglichen.

Danksagung

Dieses Projekt wird von der DFG im Rahmen des GRK 2182 NanoFab unter der Nummer 274711337 finanziell unterstützt.

Literatur

- [1] G. Jäger, T. Hausotte, E. Manske, H.-J. Büchner, R. Mastlylo, N. Dorozhovets, and N. Hofmann, "Nanomeasuring and nanopositioning engineering," *Measurement* **43**(9), 1099–1105 (2010).
- [2] R. Mastlylo, "Optische und taktile Nanosensoren auf der Grundlage des Fokusverfahrens für die Anwendung in Nanopositionier- und Nanomessmaschinen," Ph.D. thesis, Universitätsbibliothek Ilmenau (2012).
- [3] J. Leineweber, R. Hebenstreit, A.-V. Häcker, C. Meyer, R. Füßl, E. Manske, and R. Theska, "Charakterisierung eines parallelkinematisch aktuierten In-situ-Referenzmesssystems für 5D-Nanomess- und Fabrikationsanwendungen," *tm-technisches Messen* **91**(2), 102–115 (2024).