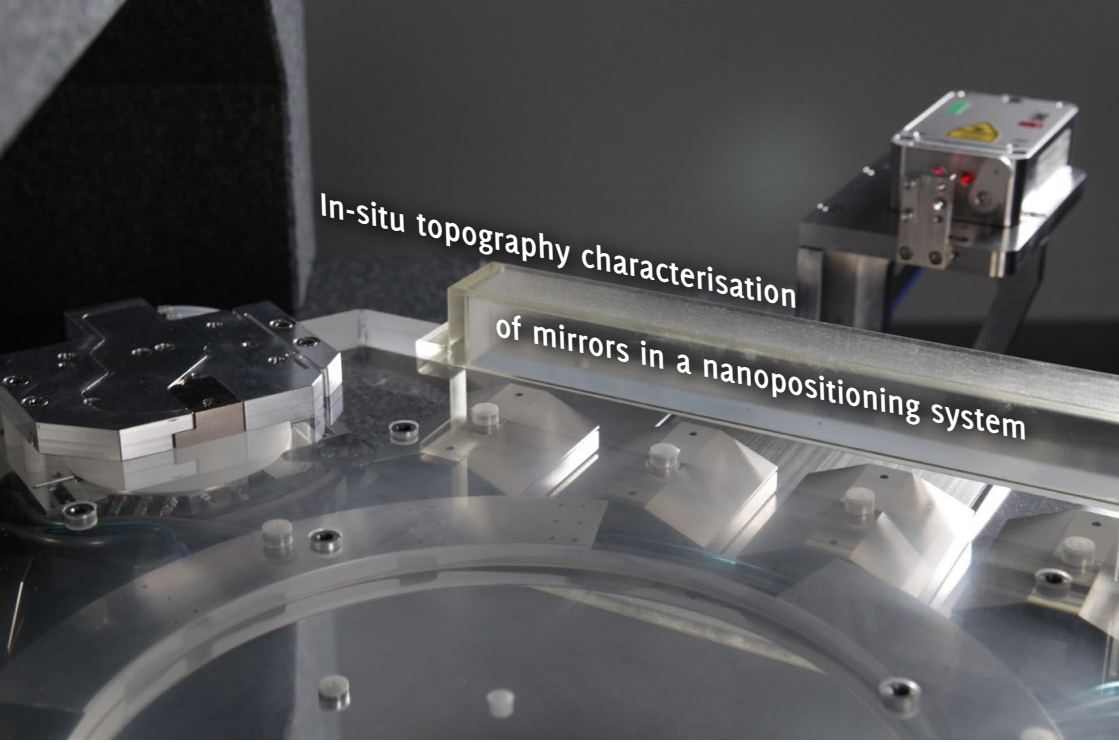


In-situ topography characterisation of mirrors in a nanopositioning system

IMMS has developed an approach that allows the reference mirrors to be characterised directly within the overall structure of a positioning system. Deviations from the ideal state of the mirrors can thus significantly improve positioning accuracy through corrective calculations. Photograph: IMMS.

Motivation and overview: the hidden impact of mirror imperfections on nanopositioning accuracy

High-precision nanopositioning systems are essential in advanced manufacturing, nanometrology, and scientific instrumentation. These systems enable controlled motion with sub-nanometre resolution over travel ranges of hundreds of millimetres – comparable to locating a single needle within a city the size of Ilmenau.

www.imms.de/nmdrives

IMMS has developed the NPS6D200, a long-range volumetric nanopositioning system designed for six-degree-of-freedom (6-DOF) control – three translational and three rotational degrees of freedom – using interferometric feedback for position sensing. At the heart of its metrology are four planar reference mirrors, which serve as fixed reference surfaces for internal sensors, including laser interferometers and an autocollimator.

Specialist article on the NPS6D200: www.imms.de

The system's control architecture assumes initially that these mirrors are geometrically ideal – perfectly flat and precisely aligned. However, in practice, deviations from this assumption can significantly degrade performance. Even small errors

© IMMS GmbH. All rights reserved. Reproduction and publication only with express permission of IMMS GmbH.

in mirror geometry can compromise the system's ability to accurately determine position and orientation. For example, if the mirrors are not perfectly flat, the system may "lose" the reference point – just as it would be impossible to find the location in a city if the map itself is distorted.

These deviations propagate through the feedback loops and contribute to systematic errors in coordinate reconstruction, including cosine errors and parasitic motions. Without correction, such errors reduce positioning accuracy and measurement reliability.

IMMS has developed an approach that allows the actual surface topography of the reference mirrors to be characterised directly within the overall assembly of a positioning system. The measured mirror geometry, including any deformations, is corrected internally via a coordinate reconstruction of the system. This allows the positioning accuracy to be significantly improved without the need to modify the hardware or control architecture, whilst taking real-world deviations into account. This is comparable to providing the correct glasses to someone with poor eyesight: just as the wrong lens distorts the world, assuming a perfectly flat mirror leads the machine to perceive the position incorrectly.

Introduction: the challenge of measuring what's already in use

The NPS6D200 (figure 1) is a long-range nanopositioning system designed for six-degree-of-freedom (6-DOF) control – meaning it can move and rotate in three directions (X, Y, Z) and three rotational axes (yaw, pitch, roll). It achieves nanometre-level precision over a horizontal range of 200 mm and a vertical range of 25 mm.

To track its position, the system uses four planar mirrors:

- Mirror U: Controls yaw rotation (φ_Z),
- Mirrors V and W: Control X and Y translation,
- Mirror Z: Controls Z translation and X/Y rotation (φ_X und φ_Y) – pitch and roll.

Internal sensors – laser interferometers and an autocollimator – rely on the four reference mirrors to measure the system's position and orientation. However, because these mirrors are not perfectly flat or perfectly aligned in practice, real-world effects degrade their performance. Gravity pulls downward on the mirrors, causing them to sag slightly – similar to how a wire sags between two supports under its own weight.

© IMMS GmbH. All rights reserved. Reproduction and publication only with express permission of IMMS GmbH.

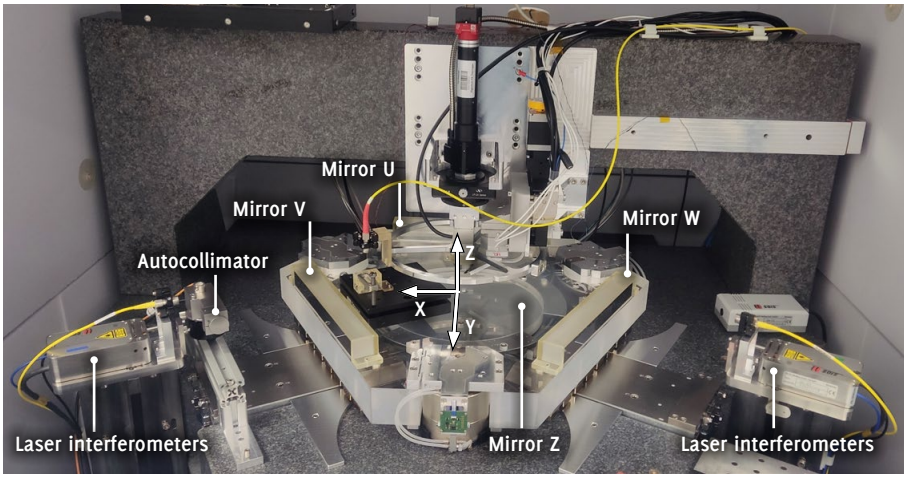


Figure 1: NPS6D200 equipped with an external autocollimator. Photograph: IMMS.

Clamps that secure the mirrors in place can introduce uneven pressure, leading to localised warping or bending. Even during manufacturing, no mirror is perfectly flat – deviations in surface form are inevitable. Over time, temperature changes and mechanical vibrations can further shift the mirrors' positions or stresses, introducing small but cumulative changes. Together, these factors mean that the mirrors deviate from the ideal geometry, leading to systematic errors in motion and positioning that can compromise measurement accuracy.

These effects propagate through the system's feedback loops, distorting the machine's internal map. The result is that the machine "believes" it has reached the correct position, but in reality, it is offset – leading to systematic errors in measurement. Traditional ways to measure mirror shape – like using a high-resolution profilometer – require removing the mirrors from the machine. But that's like taking a car's suspension apart to measure its alignment: once you reassemble it, the alignment is different.

So, an alternative is proposed: a method that measures the mirrors while they are still in place, under real working conditions.

© IMMS GmbH. All rights reserved. Reproduction and publication only with express permission of IMMS GmbH.

Experiment details: how we measured the mirrors without touching them

The experiment was conducted on the NPS6D200 nanopositioning system using external tools without modifications to the machine.

As equipment three compact autocollimators from our partner SIOS are being used: small, portable devices that measure angular deviations with high sensitivity (±50 arcsec range). The autocollimators were mounted outside the machine and carefully aligned to the centre of each mirror. The system was operated in its normal configuration – no disassembly, no changes to the control software.

Additional equipment:

- One high-precision reference autocollimator ELCOMAT® HR manufactured by Möller Wedel was used to verify the accuracy of the other autocollimators.
- A 12-faced optical polygon: A calibrated precision angular standard used as reference surface for autocollimators verification.

To ensure accuracy, the autocollimators were verified in a different experiment against the reference autocollimator in a range of ±50 arcsec using the optical polygon.

Procedure: From Angles to 3D Maps

The procedure for mirror topography reconstruction was divided into five steps:

1) Identification of controlled degrees of freedom:

The system uses mirror U to control yaw (φ_Z) and mirror Z to control roll (φ_X) and pitch (φ_Y). Mirrors V and W are not used in these control loops, making them suitable for external measurement.

© IMMS GmbH. All rights reserved. Reproduction and publication only with express permission of IMMS GmbH.

2) Coordinate system definition:

A local coordinate system was defined for each mirror:

- Origin: Centre of the mirror,
- Horizontal axis: Points left when viewing the reflective face,
- Vertical axis: Opposite to the machine's vertical direction (downward),
- Normal axis: Positive height corresponds to outward movement from the mirror surface.

3) Direct displacement measurement (single-DOF detection):

For yaw characterisation, measurements were taken on mirrors V and W, see figure 2, as mirror U is used in the yaw control loop and obtained by equation 1. By measuring at multiple heights and accounting for initial angular offsets, the full topography of mirror U was reconstructed.

For roll characterisation, measurements were taken on mirrors U, V, and W, as mirror Z is used in roll control. The autocollimators were aligned to the mirror centre, and perpendicular movements were performed to maintain beam alignment.

4) Relative displacement measurement:

After direct measurements, relative displacements were determined. For example, the yaw topography of mirror V was obtained by subtracting the scaled-up measurement from mirror U from the measured signal. Similarly, roll topographies of mirror W were derived using subtraction of mirror U topography:

$$\theta_U = -\theta_{VV} = -\theta_{WW} \qquad \text{Equation 1}$$

Where θ_U is the yaw topography of the mirror U, θ_{VV} ais the angular topography obtained measuring the mirror V with a movement in V perpendicular direction and θ_{WW} is the angular topography obtained measuring the mirror W with a movement in W perpendicular direction.

© IMMS GmbH. All rights reserved. Reproduction and publication only with express permission of IMMS GmbH.

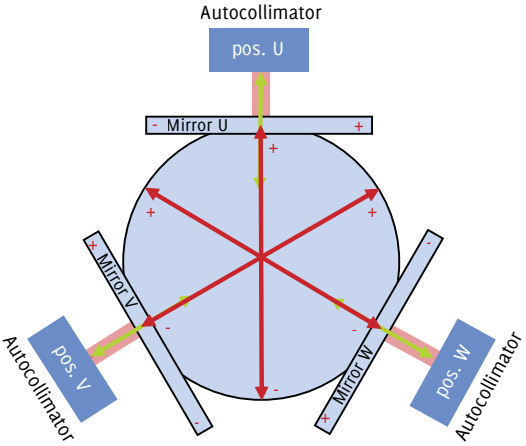


Figure 2:

Position of the autocollimators in respect of the mirrors and movements for topography detection.

Graphic: IMMS.

5) Secondary relative displacement and mirror Z reconstruction

A star-shaped motion path was used to measure multiple points on mirror Z. Since pitch rotation is not directly measurable by the autocollimators, two measurement positions were used to solve a system of two equations with two unknowns described by equation 2. The solution was obtained using a least-squares method. The final topography was reconstructed using geometric integration.

$$\varphi_{UStar}(x,y) = \varphi_{U}(x) + \varphi_{Z} \cdot \sin(\alpha) + \varphi_{ZP} \cdot \cos(\alpha)$$
$$\varphi_{VStar}(x,y) = \varphi_{V}(-x \cdot \sin(\pi/6) + y \cdot \cos(\pi/6)) + \varphi_{Z} \cdot \sin(\alpha - 2\pi/3) + \varphi_{ZP} \cdot \cos(\alpha - 2\pi/3)$$
$$\varphi_{WStar}(x,y) = \varphi_{W}(-x \cdot \sin(\pi/6) - y \cdot \cos(\pi/6)) + \varphi_{Z} \cdot \sin(\alpha + 2\pi/3) + \varphi_{ZP} \cdot \cos(\alpha + 2\pi/3)$$

Equation 2

The terms of the equation are described in table 1.

Symbol	Description
φ_{UStar}	measured topography of the mirror Z measured from mirror U
φ_{VStar}	measured topography of the mirror Z measured from mirror V
φ_{WStar}	measured topography of the mirror Z measured from mirror W
φ_{U}	roll topography of the mirror U
φ_{V}	roll topography of the mirror V
φ_{W}	roll topography of the mirror W
φ_{Z}	roll topography of the mirror Z (direction of the movement)
φ_{ZP}	topography that the autocollimator doesn't detect when it measure (pitch rotation)

Table 1: Terms of equation 2.

© IMMS GmbH. All rights reserved. Reproduction and publication only with express permission of IMMS GmbH.

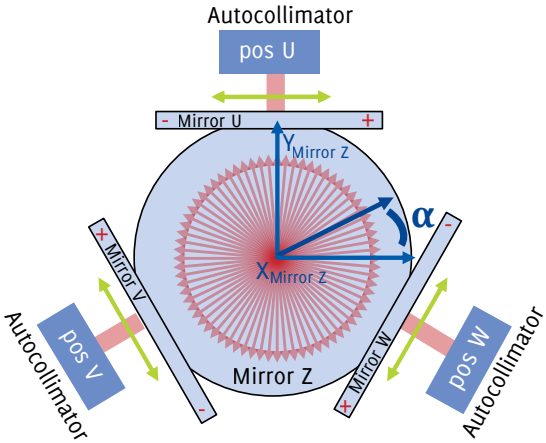


Figure 3:

Position of the autocollimators in respect of the mirrors and movements for topography detection.

Graphic: IMMS.

All measurements were performed at a speed of 5 mm/s. Thermal drift was compensated by defining a common origin at the centre of the measurement path.

Results: what the mirrors really look like

The reconstructed surface topographies of the four reference mirrors are shown in Figure 4. The results reveal deformation patterns that reflect the interplay of mechanical forces and mounting conditions.

Mirror Z exhibits the largest deviations, with values reaching approximately −1300 nm in a localised region near the lower edge. This highly localised deformation does not follow the expected pattern of uniform gravity-induced sag over three support points of the slider, where deflection would typically be symmetric and distributed across the surface. Instead, the deformation is confined to a specific area. This feature is more likely attributable to manufacturing imprecision such as non-uniform tool path during polishing.

Mirror U displays relatively small and smooth variations, with deviations ranging from about −300 nm to +300 nm across the surface. Slight increases in deviation near the edges suggest minor effects from clamping or mounting misalignment.

© IMMS GmbH. All rights reserved. Reproduction and publication only with express permission of IMMS GmbH.

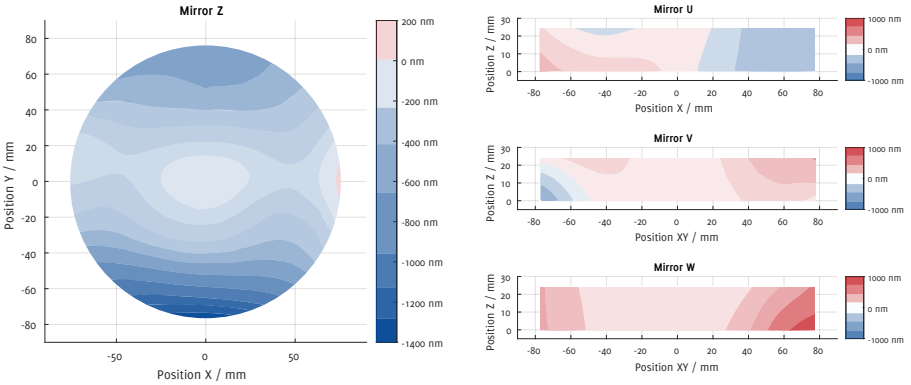


Figure 4: Topography of all machine mirrors obtained by the method. Graphic: IMMS.

Mirror V shows a symmetric deformation, with the central region remaining close to zero and deviations increasing toward the edges, reaching –500 nm. This behaviour is consistent with bending caused by clamping forces.

Mirror W, in contrast, shows deviations up to +800 nm, with a concave shape near the clamping regions. The deformation pattern differs from that of Mirror V, indicating asymmetry in how mechanical loads are transferred through the structure or in the mounting configuration.

Together, these findings indicate that mechanical constraints, mounting-induced stresses, and manufacturing imperfections are significant contributors to systematic errors in the nanopositioning system. The reconstructed topographies reflect a combination of intrinsic surface form, residual misalignment, and localised deformations arising from both mechanical loading and fabrication-related effects. While gravitational deformation is present in regions consistent with support geometry, such as gradual bending near the edges, the depression in Mirror Z is localised and asymmetric, suggesting it stems primarily from manufacturing imprecision, such as non-uniform tool paths or residual stress, rather than uniform mechanical loading. This confirms that both structural design and production quality play critical roles in determining the system's metrological performance.

© IMMS GmbH. All rights reserved. Reproduction and publication only with express permission of IMMS GmbH.

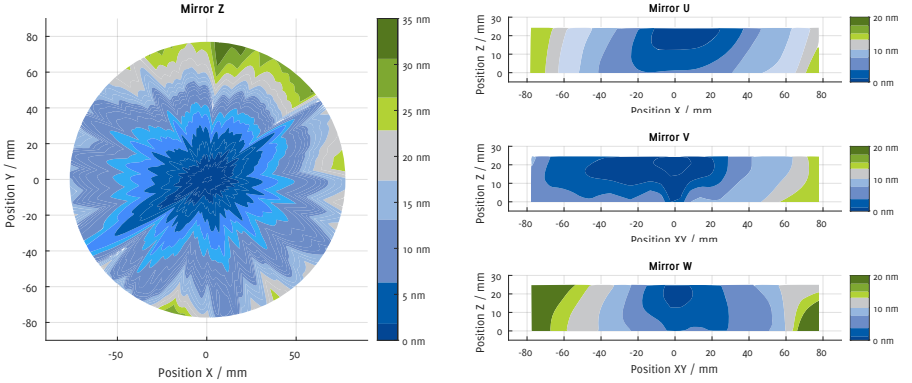


Figure 5: Standard deviation of the topography of all machine mirrors obtained by the method. Graphic: IMMS.

Reproducibility: how reliable are the measurements?

The standard deviation of the reconstructed topographies is presented in Figure 5. This map provides insight into measurement repeatability and the propagation of uncertainty through the hierarchical reconstruction process.

Mirror Z exhibits the highest variability, with standard deviations reaching up to 31 nm, particularly near the edges. This increased uncertainty arises because the mirror's topography is reconstructed last, relying on multiple relative measurements and a least-squares solution, which amplifies small errors from earlier steps.

In contrast, **Mirror U** shows the lowest uncertainty, with standard deviations remaining below 12 nm across most of the surface, and slightly higher values only at the edges. As the first mirror measured, its reconstruction is independent of prior results, making it the most stable reference.

Mirror V displays standard deviations similar to those of Mirror U, with slightly elevated values in the positive XY regions, likely due to edge effects and measurement sensitivity.

© IMMS GmbH. All rights reserved. Reproduction and publication only with express permission of IMMS GmbH.

Mirror W shows intermediate variability, with standard deviations reaching 17 nm, primarily at the edges — consistent with the propagation of uncertainty from the earlier reconstruction of Mirror U.

The overall trend of increasing standard deviation from Mirror U to V and W, and finally to Mirror Z, reflects the hierarchical nature of the method. Additional sources of variability include small differences in the machine's initial alignment after start-up – on the order of 0.1 mm – coupling between rotational degrees of freedom in the autocollimator, and environmental influences such as air currents during motion.

Conclusion: a practical path to higher precision

This work demonstrates that by using three external autocollimators, it is possible to map the surface topography of all four reference mirrors in a nanopositioning system under real operating conditions. The method captures real-world effects such as gravitational sag, clamping-induced stress, and mounting-related deformations – factors that can be overlooked when assuming ideal mirror geometry. However, the observed deformation in Mirror Z – where a localised depression of up to −1300 nm occurs near the lower edge – does not follow the expected symmetric pattern of gravity-induced sag over three support points. Instead, its asymmetric and localised deviation suggests it is more likely attributable to manufacturing imprecision, such as non-uniform tool paths during manufacturing, rather than mechanical loading alone.

By incorporating the measured mirror geometry – including both global and localised deformations – into the system's internal coordinate reconstruction, positioning accuracy can be significantly improved without requiring any modifications to the machine's hardware or control architecture.

The approach is fully in-situ: the mirrors are characterised while remaining in their operational mounting and loading conditions, eliminating the risk of altering their

© IMMS GmbH. All rights reserved. Reproduction and publication only with express permission of IMMS GmbH.

mechanical state through disassembly. All measurements are traceable through verification against a reference autocollimator and an optical polygon standard. The procedure enables accurate, in-situ characterisation of reference mirror geometry without system modifications, making it well-suited for integration into routine calibration and monitoring workflows in high-precision systems.

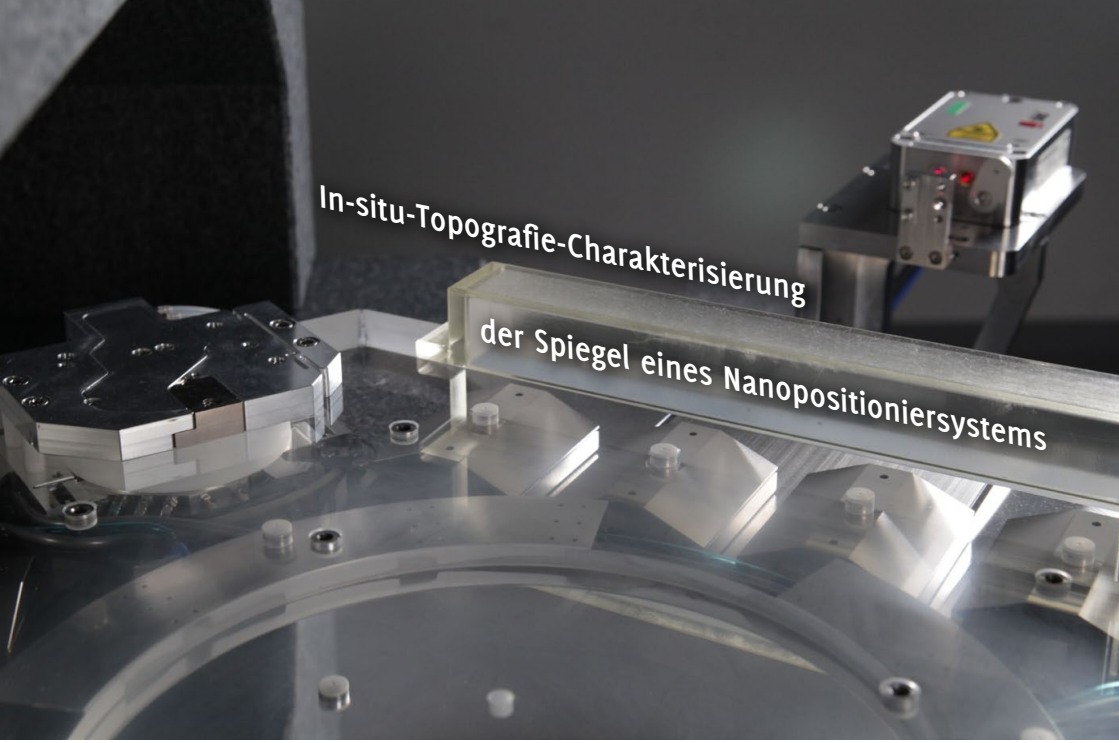
Contact person: M.Sc. Davi Anders Brasil, davi-anders.brasil@imms.de

Funded by

DFG Deutsche Forschungsgemeinschaft

The Research Training Group 2182 on Tip- and laser-based 3D-Nanofabrication in extended macroscopic working areas (NanoFab) was funded by the German Research Foundation (DFG) under the funding code DFG GRK 2182.

© IMMS GmbH. All rights reserved. Reproduction and publication only with express permission of IMMS GmbH.



Das IMMS hat einen Ansatz entwickelt, bei dem sich die Referenzspiegel direkt im Gesamtaufbau eines Positioniersystems charakterisieren lassen. Abweichungen vom Idealzustand der Spiegel können so über Korrekturrechnungen die Positioniergenauigkeit erheblich verbessern. Foto: IMMS.

Motivation und Überblick:
Der unsichtbare Einfluss von Spiegelfehlern auf die Nanopositionier-Genauigkeit

Hochpräzisions-Nanopositioniersysteme sind unverzichtbar in der hochmodernen Fertigung, Nanometrologie und wissenschaftlichen Instrumentierung. Diese Systeme ermöglichen eine geregelte Bewegung mit Subnanometer-Auflösung über Strecken von mehreren hundert Millimetern – vergleichbar damit, eine einzelne Nadel in einer Stadt der Größe von Ilmenau zu lokalisieren.

www.imms.de/nmdrives

Am IMMS wurde das NPS6D200 entwickelt, ein Nanopositionierungssystem für große Bewegungsbereiche in allen sechs Freiheitsgraden (6 DOF) – drei translatorische und drei rotatorische – mittels interferometrischem Regelungs-Feedback zur Positionsmessung. Im Mittelpunkt seines metrologischen Systems stehen vier ebene Referenzspiegel, die als feste Referenzflächen für die internen Sensoren (Laserinterferometer und ein Autokollimator) dienen.

Zum NPS6D200-Fachartikel auf www.imms.de

Die Regelungsarchitektur des Systems geht zunächst davon aus, dass diese Spiegel geometrisch ideal sind – perfekt eben und exakt ausgerichtet. In der Praxis kön-

© IMMS GmbH. Alle Rechte sind vorbehalten. Vervielfältigung und Veröffentlichung nur mit Genehmigung der IMMS GmbH.

nen Abweichungen von dieser Annahme jedoch die Leistung des Positioniersystems erheblich verschlechtern. Schon kleine Fehler in der Spiegelgeometrie können die Fähigkeit des Systems beeinträchtigen, Position und Orientierung präzise zu bestimmen. Wenn die Spiegel beispielsweise nicht vollkommen flach sind, kann dem System der Referenzpunkt „verloren gehen" – genauso wie es unmöglich wäre, einen Ort in einer Stadt zu finden, wenn die Karte selbst verzerrt ist.

Diese Abweichungen wirken durch die Feedbackschleifen fort und führen zu systematischen Fehlern in der Koordinatenrekonstruktion, einschließlich Kosinusfehler und parasitären Bewegungen. Ohne Korrektur verringern solche Fehler die Positionierungsgenauigkeit und die Zuverlässigkeit der Messungen.

Das IMMS hat einen Ansatz entwickelt, bei dem sich die tatsächliche Oberflächentopografie der Referenzspiegel direkt im Gesamtaufbau eines Positioniersystems charakterisieren lässt. Die gemessene Spiegelgeometrie inklusive Verformungen wird intern über eine Koordinatenrekonstruktion des Systems korrigiert. Darüber kann die Positioniergenauigkeit erheblich verbessert werden, ohne dass die Hardware oder die Steuerarchitektur angepasst werden müssen, und reale Abweichungen werden so berücksichtigt. Das ist vergleichbar mit der Gabe der richtigen Brille an jemanden mit Sehschwäche: So, wie eine falsche Linse die Welt verzerrt, führt die Annahme eines vollkommen flachen Spiegels dazu, dass die Maschine die Position verfälscht wahrnimmt.

Einführung: Die Herausforderung, eingebaute Spiegel im laufenden Betrieb zu messen

Das NPS6D200 (Abb. 1) ist ein Nanopositionierungssystem für große Bewegungsbereiche, das für die Bewegung in sechs Freiheitsgraden (6 DOF) ausgelegt ist. Das heißt, es kann sich in drei Richtungen (X, Y, Z) translatorisch bewegen und um drei Achsen (Gieren, Nicken, Rollen) rotieren. Es erreicht Nanometer-Genauigkeit über einen horizontalen Bewegungsbereich mit einem Durchmesser von 200 mm und einen vertikalen Bereich von 25 mm.

Zur Positionsverfolgung nutzt das System vier ebene Spiegel:

- Spiegel U: Regelung der Gier-Rotation (φ_Z),
- Spiegel V und W: Regelung von X- und Y-Translation,
- Spiegel Z: Regelung der Z-Translation und der X/Y-Rotationen (φ_X und φ_Y) – Nicken und Rollen.

© IMMS GmbH. Alle Rechte sind vorbehalten. Vervielfältigung und Veröffentlichung nur mit Genehmigung der IMMS GmbH.

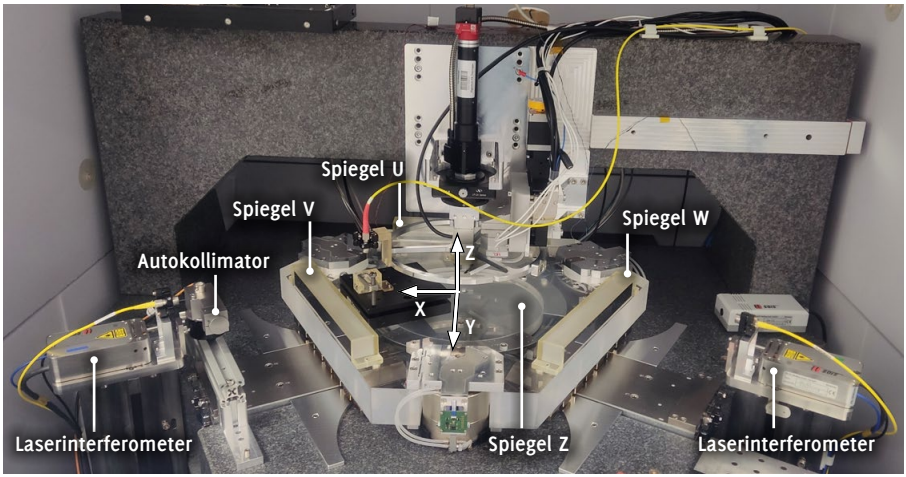


Abbildung 1: NPS6D200 mit zusätzlichem externem Autokollimator. Foto: IMMS.

Interne Sensoren – Laserinterferometer und ein Autokollimator – setzen auf die vier Referenzspiegel, um die Position und Orientierung des Systems zu messen. In der Praxis sind diese Spiegel jedoch nicht perfekt eben oder exakt ausgerichtet, sodass reale Effekte ihre Leistung verschlechtern. Die Schwerkraft lässt die Spiegel leicht nach unten durchhängen – ähnlich wie ein Draht zwischen zwei Aufhängungen unter seinem eigenen Gewicht nachgibt. Klemmungen, welche die Spiegel an Ort und Stelle haltern, können ungleichmäßigen Druck erzeugen, was zu lokalen Verformungen oder Verbiegungen führt. Schon während der Herstellung ist kein Spiegel vollkommen eben – Oberflächenformabweichungen sind unvermeidlich. Im Laufe der Zeit können Temperaturänderungen und mechanische Schwingungen die Positionen oder mechanischen Spannungen der Spiegel weiter verschieben und kleine, aber kumulative Veränderungen verursachen. Kombiniert bedeuten diese Faktoren, dass die Spiegel von der idealen Geometrie abweichen, was zu systematischen Fehlern während der Bewegung und Positionierung führt und die Messgenauigkeit verringern kann.

Diese Effekte propagieren durch die Feedbackschleifen der Maschine und verzerren die interne Karte der Maschine. Im Ergebnis glaubt die Maschine, die korrekte Position erreicht zu haben, tatsächlich ist sie aber von dieser versetzt – was zu systematischen Messfehlern führt. Traditionelle Verfahren zur Messung der Spiegelform – etwa mit einem hochauflösenden Profilometer – erfordern das Entfernen der Spiegel aus der Maschine. Das ist vergleichbar damit, die Aufhängung eines Autos auseinanderzunehmen, um seine Ausrichtung zu bestimmen: sobald man sie wieder

© IMMS GmbH. Alle Rechte sind vorbehalten. Vervielfältigung und Veröffentlichung nur mit Genehmigung der IMMS GmbH.

zusammenbaut, ist die Ausrichtung anders. Aus diesem Grund wird eine Alternative vorgeschlagen: Eine Methode, welche die Spiegel vermisst, während sie noch an ihrem Platz sind, und unter realen Betriebsbedingungen.

Experimentbeschreibung: Wie wir die Spiegel vermessen haben, ohne sie zu beeinflussen

Das Experiment wurde am Nanopositionierungssystem NPS6D200 durchgeführt, wobei ausschließlich externe Sensorik ohne Änderungen an der Maschine verwendet wurde.

Es wurden drei kompakte Autokollimatoren des Partners SIOS zur Vermessung eingesetzt: kleine, tragbare Geräte, die Winkelabweichungen mit hoher Empfindlichkeit im Bereich ± 50 arcsec messen. Die Autokollimatoren wurden außen an der Maschine montiert und sorgfältig auf den Mittelpunkt jedes Spiegels ausgerichtet. Das System wurde in seiner normalen Konfiguration betrieben – keine Demontage, keine Änderungen an der Steuerungssoftware.

Zusätzliche Sensorik:

- Ein hochpräziser Referenzautokollimator ELCOMAT® HR der Firma Möller Wedel diente zur Überprüfung der Genauigkeit der anderen Autokollimatoren.
- Ein 12-seitiges optisches Polygon wurde als kalibrierter Präzisionswinkelstandard als Referenzfläche für die Verifikation der Autokollimatoren genutzt.

Um die Genauigkeit der Autokollimatoren sicherzustellen, wurden diese in einem separaten Experiment gegen den Referenzautokollimator im Bereich von ± 50 arcsec mithilfe des optischen Polygons verifiziert.

Ablauf: Von einzelnen Winkeln zur 3D-Karte

Der Ablauf zur Rekonstruktion der Spiegel-Topografie wurde in fünf Schritte unterteilt:

1) Identifizierung der geregelten Freiheitsgrade:

Das System nutzt den U-Spiegel zur Gierregelung (φ_Z) und den Z-Spiegel zur Roll- (φ_X) und Nickregelung (φ_Y). Da die Spiegel V und W nicht in diesen Regelschleifen verwendet werden, werden sie für externe Messungen nutzbar.

© IMMS 2025
© IMMS GmbH. Alle Rechte sind vorbehalten. Vervielfältigung und Veröffentlichung nur mit Genehmigung der IMMS GmbH.

2) Definition des Koordinatensystems:

Für jeden Spiegel wurde ein lokales Koordinatensystem definiert:

- Ursprung: Spiegelmittelpunkt,
- horizontale Achse: zeigt bei Blick auf die reflektive Oberfläche nach links,
- vertikale Achse: entgegen der vertikalen Achse der Maschine (also senkrecht nach unten),
- Normal-Achse: Positive Höhen entsprechen einer Erhebung aus der Spiegeloberfläche heraus.

3) Direkte Abstandsmessung (Einzel-DoF-Ermittlung):

Für die Gier-Charakterisierung wurden Messungen an den Spiegeln V und W durchgeführt und entsprechend Gleichung 1 umgesetzt (siehe Abbildung 2), da der Spiegel U für die Gier-Regelschleife genutzt wird. Durch Messungen auf mehreren Höhen und durch Berücksichtigung anfänglicher Winkel-Offsets wurde die vollständige Topografie von Spiegel U rekonstruiert.

Für die Charakterisierung der Rolltopogrpahie wurden Messungen an den Spiegeln U, V und W durchgeführt, da für die Rollregelung nur Spiegel Z verwendet wird. Die Autokollimatoren wurden jeweils auf den Mittelpunkt jedes Spiegels ausgerichtet und senkrechte Bewegungen wurden vorgenommen, um die Strahlenausrichtung beizubehalten.

4) Relative Verschiebungsmessungen:

Nach den direkten Messungen wurden die relativen Verschiebungen bestimmt. Beispielsweise wurde die Giertopografie vom Spiegel V ermittelt, indem der hochskalierte Messwert vom Spiegel U von den Messdaten subtrahiert wurde. Ähnlich wurden die Rolltopografien des Spiegel W durch Subtraktion der Topographfie vom Spiegel U wie folgt abgeleitet:

$$\theta_U = -\theta_{VV} = -\theta_{WW} \qquad \text{Gleichung 1}$$

mit θ_U als Giertopografie des Spiegels U, θ_{VV} als Winkeltopografie, abgeleitet aus den Messungen an Spiegel V unter Aufnahme einer Bewegung normal zur nominellen W-Spiegeloberfläche, und θ_{WW} als Winkeltopografie, abgeleitet aus den Messungen an Spiegel W unter Aufnahme einer Bewegung normal zur nominellen W-Spiegeloberfläche.

© IMMS GmbH. Alle Rechte sind vorbehalten. Vervielfältigung und Veröffentlichung nur mit Genehmigung der IMMS GmbH.

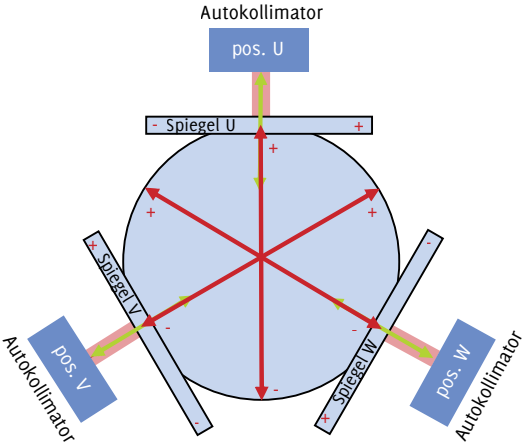


Abbildung 2:

Position der Autokollimatoren bezüglich der Spiegel und der durchgeführten Bewegungen für die Topografie-Detektion.

Grafik: IMMS.

5) Sekundäre relative Verschiebung und Spiegel-Z-Rekonstruktion

Eine sternförmige Bewegung wurde verwendet, um multiple Punkte auf Spiegel Z zu messen. Da die Nickrotation nicht direkt durch die Autokollimatoren erfasst werden kann, wurden zwei Messpositionen eingesetzt, um ein System aus zwei Gleichungen mit zwei Unbekannten zu lösen, das in Gleichung 2 beschrieben wird. Die Lösung wurde mittels einer kleinsten-Quadrate-Methode ermittelt. Die endgültige Topografie wurde anschließend durch geometrische Integration rekonstruiert.

$$\varphi_{UStar}(x,y) = \varphi_U(x) + \varphi_Z \cdot \sin(\alpha) + \varphi_{ZP} \cdot \cos(\alpha)$$
$$\varphi_{VStar}(x,y) = \varphi_V(-x \cdot \sin(\pi/6) + y \cdot \cos(\pi/6)) + \varphi_Z \cdot \sin(\alpha - 2\pi/3) + \varphi_{ZP} \cdot \cos(\alpha - 2\pi/3)$$
$$\varphi_{WStar}(x,y) = \varphi_W(-x \cdot \sin(\pi/6) - y \cdot \cos(\pi/6)) + \varphi_Z \cdot \sin(\alpha + 2\pi/3) + \varphi_{ZP} \cdot \cos(\alpha + 2\pi/3)$$

Gleichung 2

Die Symbole der Gleichungen sind in Tabelle 1 beschrieben.

Symbol	Beschreibung
φ_{UStar}	gemessene Topografie des Z-Spiegels ausgehend vom U-Spiegel
φ_{VStar}	gemessene Topografie des Z-Spiegels ausgehend vom V-Spiegel
φ_{WStar}	gemessene Topografie des Z-Spiegels ausgehend vom W-Spiegel
φ_U	Roll-Topografie des U-Spiegels
φ_V	Roll-Topografie des V-Spiegels
φ_W	Roll-Topografie des W-Spiegels
φ_Z	Roll-Topografie des Z-Spiegels (in Bewegungsrichtung)
φ_{ZP}	Topografie, die der Autokollimator während der Messung nicht detektiert (Nickrotation)

Tabelle 1: Terme der Gleichung 2

© IMMS GmbH. Alle Rechte sind vorbehalten. Vervielfältigung und Veröffentlichung nur mit Genehmigung der IMMS GmbH.

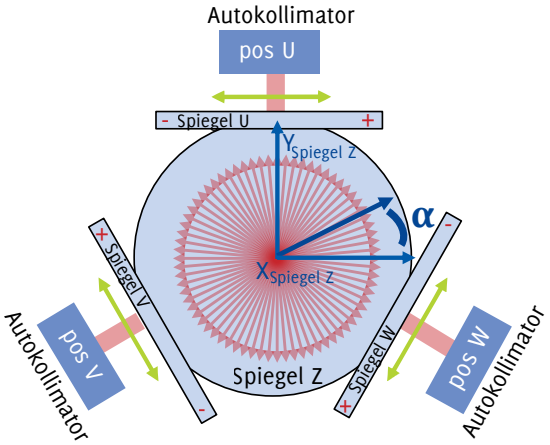


Abbildung 3

Position den Autokollimatoren bezüglich der Spiegel und Bewegung für die Topografie-Detektion.

Grafik: IMMS.

Alle Messungen wurden bei einer Geschwindigkeit von 5 mm/s durchgeführt. Thermischer Drift wurde kompensiert, indem ein gemeinsamer Ursprung im Zentrum der Messbewegungen definiert wurde.

Ergebnisse: Wie die Spiegel aussehen

Die rekonstruierten Oberflächentopografien der vier Referenzspiegel sind in Abbildung 4 dargestellt. Die Ergebnisse zeigen Deformationsmuster, die das Zusammenspiel von mechanischen Kräften und Befestigungsbedingungen widerspiegeln.

Der **Z-Spiegel** weist die größten Abweichungen auf, mit Werten von bis zu ca. –1300 nm in einem begrenzten Bereich nahe dem unteren Rand. Diese hochgradig lokale Deformation folgt nicht dem erwarteten Muster einer gleichmäßigen, durch die Schwerkraft verursachten Durchbiegung über drei Auflagepunkte des Läufers, bei dem die Durchbiegung typischerweise symmetrisch über die Oberfläche verteilt wäre. Stattdessen ist die Deformation auf einen bestimmten Bereich beschränkt. Dieses Merkmal lässt sich eher auf Fertigungsunregelmäßigkeiten wie eine nicht gleichmäßige Werkzeugbahn während des Polierens zurückführen.

Der **U-Spiegel** zeigt relativ kleine Variationen, mit Abweichungen von etwa –300 nm bis +300 nm über die gesamte Oberfläche. Leichte Zunahmen der Abweichung in der Nähe der Ränder deuten auf geringfügige Einflüsse durch das Klemmen oder Montage-Fehlstellungen hin.

© IMMS GmbH. Alle Rechte sind vorbehalten. Vervielfältigung und Veröffentlichung nur mit Genehmigung der IMMS GmbH.

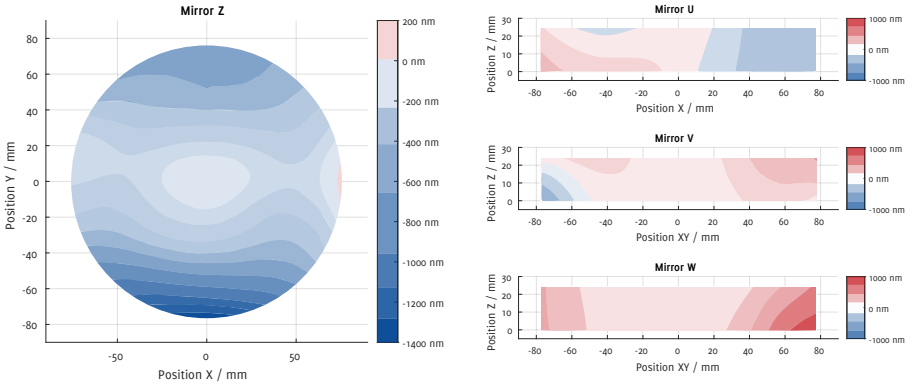


Abbildung 4: Topografien aller Spiegel des Positioniersystems, welche durch die vorgestellte Methode aufgenommen wurden. Grafik: IMMS.

Der **V-Spiegel** weist eine symmetrische Deformation auf, wobei der zentrale Bereich nahe Null bleibt und die Abweichungen zu den Rändern hin zunehmen, bis zu –500 nm. Dieses Verhalten ist konsistent mit einer durch Klemmkräfte verursachten Biegung.

Der **W-Spiegel** dagegen zeigt Abweichungen bis zu +800 nm mit einer konkaven Form in der Nähe der Klemmbereiche. Das Deformationsmuster unterscheidet sich von dem des V-Spiegels und deutet auf eine Asymmetrie in der Übertragung der mechanischen Lasten durch die Struktur oder durch die Montageart hin.

Gemeinsam zeigen diese Erkenntnisse, dass mechanische Beschränkungen, Montage-induzierte Spannungen und Fertigungsabweichungen signifikant zu den systematischen Positionierfehlern von Nanopositioniersystemen beitragen. Die rekonstruierten Topografien zeigen eine Kombination aus intrinsischer Oberflächenform, verbleibenden Ausrichtungsfehlern und lokalen Deformationen, welche aus mechanischen Belastungen und durch die Herstellung verursachten Fehlern resultieren. Während die durch die Gravitation verursachten Deformationen in Bereichen auftreten, die mit der Auflagegeometrie übereinstimmen, etwa entsprechend gradueller Biegungen in der Nähe der Ränder, ist die Vertiefung im Z-Spiegel örtlich definiert und asymmetrisch. Das deutet darauf hin, dass sie vor allem auf Fertigungsfehler wie nicht gleichmäßige Werkzeugbahnen oder Restspannungen zurückzuführen ist und nicht auf eine gleichmäßige mechanische Belastung. Dies bestätigt, dass sowohl das strukturelle Design als auch die Produktionsqualität entscheidende Rollen bei der Bestimmung der metrologischen Leistungsfähigkeit des Systems spielen.

© IMMS GmbH. Alle Rechte sind vorbehalten. Vervielfältigung und Veröffentlichung nur mit Genehmigung der IMMS GmbH.

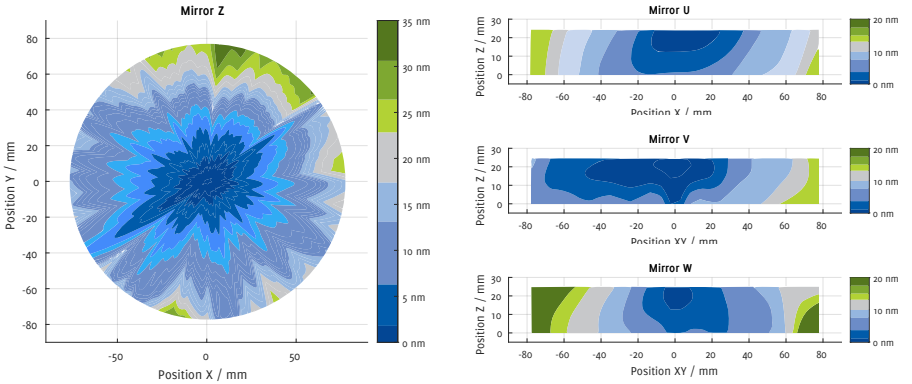


Abbildung 5: Standardabweichung der Topografien aller Spiegel des Positioniersystems entsprechend der präsentierten Methode. Grafik: IMMS.

Reproduzierbarkeit: Wie verlässlich sind die Messungen?

Die Standardabweichung der rekonstruierten Topografien ist in Abbildung 5 dargestellt. Diese Kartendarstellung gibt Aufschluss über die Wiederholbarkeit der Messungen und die Ausbreitung der Unsicherheit im hierarchischen Rekonstruktionsprozess.

Der **Z-Spiegel** weist die höchste Streuung auf, mit Standardabweichungen von bis zu 31 nm, insbesondere in der Nähe der Ränder. Diese erhöhte Unsicherheit entsteht, weil die Topografie des Spiegels in der Reihenfolge zuletzt rekonstruiert wird und dabei mehrere relative Messungen sowie eine Kleinste-Quadrate-Lösung verwendet werden, wodurch kleine Fehler aus früheren Schritten verstärkt werden.

Im Gegensatz dazu zeigt der **U-Spiegel** die geringste Unsicherheit, mit Standardabweichungen, die in den meisten Bereichen unter 12 nm bleiben, und nur leicht höheren Werten an den Rändern. Da er der zuerst gemessene Spiegel ist, ist seine Rekonstruktion unabhängig von vorherigen Ergebnissen, was ihn zum stabilsten Referenzspiegel macht.

Der **V-Spiegel** weist Standardabweichungen ähnlich denen des U-Spiegels auf, mit leicht erhöhten Werten in den positiven X-Y-Bereichen, vermutlich aufgrund von Randeffekten und Messempfindlichkeit.

© IMMS GmbH. Alle Rechte sind vorbehalten. Vervielfältigung und Veröffentlichung nur mit Genehmigung der IMMS GmbH.

Der **W-Spiegel** zeigt eine mittlere Streuung, mit Standardabweichungen von bis zu 17 nm, vor allem an den Rändern. Das stimmt mit der Ausbreitung der Unsicherheit aus der früheren Rekonstruktion des U-Spiegels überein.

Die allgemeine Tendenz, dass die Standardabweichung vom U-Spiegel über V-Spiegel und W-Spiegel hinweg bis zu Z-Spiegel ansteigt, spiegelt die hierarchische Struktur der Methode wider. Weitere Quellen der Abweichungen sind kleine Unterschiede in der Initialposition der Maschine nach dem Start (im Bereich von etwa 0,1 mm), Verkopplungen zwischen den Rotationsfreiheitsgraden des Autokollimators sowie Umwelteinflüsse wie Luftströmungen während der Läufer-Bewegung.

Fazit: Ein praktischer Weg zu höherer Präzision

Diese Arbeit zeigt, dass durch den Einsatz von drei externen Autokollimatoren die Oberflächentopografien aller vier Referenzspiegel in einem Nanopositioniersystem unter realen Betriebsbedingungen abgebildet werden können. Die präsentierte Methode erfasst reale Effekte wie Schwerkraft-bedingte Durchbiegung, durch Klemmungen induzierte Spannungen und befestigungsbedingte Deformationen – Faktoren, die bei der Annahme einer idealen Spiegelgeometrie leicht übersehen werden können.

Die beobachtete Deformation beim Z-Spiegel – dort tritt eine lokal begrenzte Vertiefung von bis zu −1300 nm nahe dem unteren Rand auf – folgt nicht dem erwarteten symmetrischen Muster einer Schwerkraft-bedingten Durchbiegung über drei Auflagepunkten. Stattdessen deutet die asymmetrische und lokal begrenzte Abweichung eher auf Fertigungsfehler hin, wie beispielsweise ungleichmäßige Werkzeugbahnen während der Herstellung, und nicht ausschließlich auf mechanische Belastungen.

Durch die Einbeziehung der gemessenen Spiegelgeometrie – sowohl globaler als auch lokaler Deformationen – in die interne Koordinatenrekonstruktion des Systems kann die Positioniergenauigkeit erheblich verbessert werden, ohne dass Änderungen an der Hardware oder der Steuerarchitektur erforderlich sind.

© IMMS GmbH. Alle Rechte sind vorbehalten. Vervielfältigung und Veröffentlichung nur mit Genehmigung der IMMS GmbH.

Der Ansatz ist vollständig in-situ: Die Spiegel werden charakterisiert, während sie in ihrer Betriebsbefestigungs- und -belastungslage verbleiben. Dadurch wird das Risiko eliminiert, ihren mechanischen Zustand durch Demontage zu verändern. Alle Messungen sind durch die Verifikation gegen einen Referenzautokollimator und ein optisches Polygon Standard rückführbar. Das Verfahren ermöglicht eine genaue, In-situ-Charakterisierung der Spiegelgeometrie ohne Systemmodifikationen und eignet sich daher hervorragend für die Integration in routinemäßige Kalibrierungs- und Überwachungs-Workflows in Hochpräzisionssystemen.

Kontakt: M.Sc. Davi Anders Brasil, davi-anders.brasil@imms.de

Gefördert durch
DFG Deutsche Forschungsgemeinschaft

Das Graduiertenkolleg 2182 „Spitzen- und laserbasierte 3D-Nanofabrikation in ausgedehnten makroskopischen Arbeitsbereichen“ wurde unter dem Förderkennzeichen DFG GRK 2182 der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert.

www.imms.de/nanofab

© IMMS GmbH. Alle Rechte sind vorbehalten. Vervielfältigung und Veröffentlichung nur mit Genehmigung der IMMS GmbH.