

Florian Fern\*, Roland Füßl, Eberhard Manske, Ralf Schienbein, René Theska, Ingo Ortlepp und Johannes Leineweber

# Messunsicherheitsbetrachtungen an einem fünfachsigen Nano-Koordinatenmessgerät *NMM-5D* nach einem vektoriellen Ansatz

Measurement uncertainty analysis on a five-axis nano coordinate measuring machine *NMM-5D* following a vectorial approach

<https://doi.org/10.1515/teme-2020-0092>

Eingang 29. November 2020; angenommen 14. Januar 2021

**Zusammenfassung:** Dieser Beitrag zeigt ein Konzept für eine fünfachsige Nano-Koordinatenmessmaschine zur Messung auf stark gekrümmten asphärischen und frei geformten optischen Oberflächen in einem Messvolumen von  $25\text{ mm} \times 25\text{ mm} \times 5\text{ mm}$  mit einem maximal möglichen Neigungswinkel von bis zu  $60^\circ$  zur Hochachse und einer maximalen Rotation von  $360^\circ$  um die Hochachse. Dabei wird die Probe translatorisch bewegt und der Sensor in seiner Orientierung verändert. Unter Einhaltung des Abbe-Komparatorprinzips für alle Messachsen wird die Bewegungsabweichung des Sensors bei der Rotation durch ein in-situ-Referenzmesssystem erfasst. Dieses besteht aus drei kartesisch angeordneten Fabry-Pérot-Interferometern mit dem Ursprung im Antastpunkt des Sensors, die den Abstand zu einer hemisphärischen Referenzfläche messen. Die Messunsicherheitsbetrachtung des Gesamtsystems erfolgt nach dem *guide to the expression of uncertainty in measurement* in einem vektoriellen Ansatz und liefert unter konservativen Annahmen eine Unsicherheit des Antastpunktes von maximal  $72\text{ nm}$  ( $k = 1$ ).

**Schlagwörter:** Nanomesstechnik, KMG, Messunsicherheit, GUM, Monte Carlo.

**Abstract:** In this paper a novel concept of a five axes nano coordinate measuring machine for the measurement on strongly curved aspheric and freeform optics is shown. Thereby the sample is moved translational in a measuring volume of  $25\text{ mm} \times 25\text{ mm} \times 5\text{ mm}$  and the sensor can

\***Korrespondenzautor:** Florian Fern, Technische Universität Ilmenau, Institute of Process Measurement and Sensor Technology, Ilmenau, Germany, E-Mail: [florian.fern@tu-ilmenau.de](mailto:florian.fern@tu-ilmenau.de)

Roland Füßl, Eberhard Manske, Ingo Ortlepp, Johannes Leineweber, Technische Universität Ilmenau, Institute of Process Measurement and Sensor Technology, Ilmenau, Germany, ORCID:

<https://orcid.org/0000-0002-5611-7852> (I. Ortlepp)

Ralf Schienbein, René Theska, Technische Universität Ilmenau, Department of Precision Engineering, Ilmenau, Germany

be tilted up to an angle of  $60^\circ$  and it can be rotated up  $360^\circ$  around the z-axis. By strictly following the abbe comparator principle, the motion error that occurs during the sensor rotation is measured by an in-situ reference measuring system. It consists of three Fabry-Pérot-Interferometers whose measuring directions span a cartesian coordinate system with the origin in the sensors probing point. Those interferometers measure the distance to concentric arranged reference hemisphere. The measurement uncertainty is derived according to the *Guide to the expression of uncertainty in measurement*. A conservative estimation shows a maximum uncertainty of the probing point of  $72\text{ nm}$  ( $k = 1$ ).

**Keywords:** Nanometrology, CMM, measurement uncertainty, GUM, Monte Carlo.

## 1 Einleitung

Durch die vermehrte Nutzung von stark gekrümmten Asphären oder frei geformten optischen Oberflächen konnten beeindruckende Leistungen mit optischen Systemen erreicht werden. Die erzielbare Fertigungsqualität hängt dabei jedoch stark von der verfügbaren Messtechnik und deren erreichbarer Messunsicherheit ab [1]. Dabei ist die Messung an solchen Flächen immer noch eine Herausforderung. Vergleichsmessungen an verschiedenen Asphären zwischen einer Vielzahl an Laboren, Messverfahren und Geräten (optische Koordinatenmesstechnik, taktile Koordinatenmesstechnik, Computergenerierte Hologramme (CGH), Tilted-Wave-Interferometer [2] oder Sub-Aperture-Stitching Interferometrie), zeigen bei zunehmender Steigung der Asphären eine stark verringerte Übereinstimmung. Die verwendeten Koordinatenmessgeräte mit optischer Antastung sind auf Grund einer fehlenden translatorischen Freiheit ihrer Kinematik in der Möglichkeit zur Messung von Freiformen beschränkt [3, 4].

Für die Nanomesmaschine-1 (*NMM-1*) [5, 6] wird eine Erweiterung der Bewegungsmöglichkeiten um zwei zusätzliche Rotationsachsen entwickelt. So ist eine Ausrichtung des Sensors orthogonal zur lokalen Probenoberfläche möglich. Durch die orthogonale Ausrichtung kann die zu erwartende Unsicherheit des Antastsystems deutlich reduziert werden, gleichzeitig werden die Messmöglichkeiten für stark gekrümmte Oberflächen deutlich erweitert.

Abschnitt 2 befasst sich mit den Grundlagen der *NMM-1* und Abschnitt 3 mit den theoretischen Grundlagen der Erweiterung um zwei Rotationsachsen. Im 4. Abschnitt wird das vektorielle Messunsicherheitsmodell der in Abschnitt 5 beschriebenen Erweiterung im Detail erläutert und bewertet. Den Abschluss bilden die Zusammenfassung in Abschnitt 5 und der Ausblick in Abschnitt 6.

## 2 Grundlagen

### 2.1 NMM-1

Die *NMM-1* ist ein 3D-Abbe-Komparator [7]. Die Probe wird relativ zu einem ortsfesten, punktförmig antastenden optischen Sensor bewegt. In einem Bewegungsbe- reich von  $25\text{ mm} \times 25\text{ mm} \times 5\text{ mm}$  wird die Position der Probe durch je ein Michelson-Interferometer [8] in  $\vec{e}_x$ -,  $\vec{e}_y$ -, und  $\vec{e}_z$ -Richtung erfasst. Dazu befindet sich die Probe auf einer sogenannten Raumpiegelecke deren Außenseiten verspiegelt sind und als Reflektor für die Interferometer dienen. Die Messachsen der Interferometer schneiden sich im Antastpunkt des Sensors und das Abbe-Komparator Prinzip ist in allen Messrichtungen eingehalten [9].

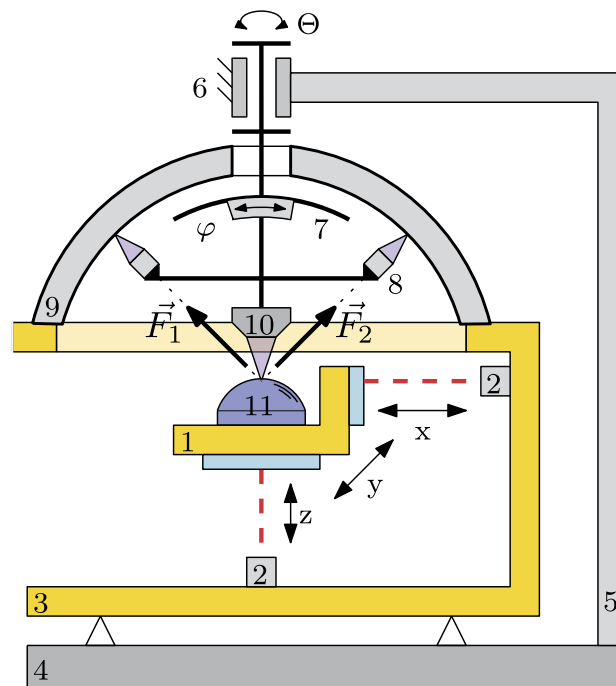
### 2.2 Vektorielles Messunsicherheitsmodell der *NMM-1*

Um den komplexen Zusammenhängen und deren Auswirkungen auf die Messunsicherheit bei Messaufgaben der *NMM-1* gerecht zu werden, wird die Messung des Einzelpunktes als geschlossener Vektorzug aus verschiedenen Untervektoren betrachtet. Man spricht dabei von einem vektoriellen Messunsicherheitsmodell. Im GUM wird in erster Linie die Messunsicherheitsbetrachtung an skalaren Größen beschrieben. Bei der Beschreibung von Messungen im dreidimensionalen Raum stößt dieses Vorgehen hinsichtlich der Übersichtlichkeit an seine Grenzen. Um die Modellbildung zu vereinfachen, wird jeder Einfluss auf den Messpunkt durch einen dreidimensionalen Vektor beschrieben. Jeder dieser Vektoren ist das Ergebnis einzelner Untermodelle. Diese Vektoren bilden in Summe

einen geschlossenen Vektorzug. Somit kann die Messunsicherheit für den Abstand zwischen zwei Messpunkten, wie beispielsweise bei der Vermessung eines Stufenhöhennormalen, als Differenz zwischen zwei dieser Vektorzüge beschrieben werden [10]. Es ist dabei darauf zu achten, dass die einzelnen Vektoren der Untermodelle keine Korrelationen zwischen den Eingangsgrößen aufweisen. Mit Hilfe dieser vektoriellen Zerlegung in Untermodelle, kann deren Einfluss auf das Messergebnis leichter und systematischer modelliert werden und die vollständige Modellgleichung kann als Summe der Vektoren der Untermodelle dargestellt werden.

## 3 NMM-5D

Das im folgenden beschriebene System zur rotatorischen Ausrichtung des Sensors mit dem zugehörigen in-situ-Referenzmesssystem wird als Erweiterung der bisherigen *NMM-1* verwendet. Dazu bleibt die *NMM-1* bis auf den Antastsensor vollständig bestehen. Zusammen ergibt sich die *NMM-5D*. Dabei steht das 5D für den Freiheitsgrad 5 (Degree of freedom) zwischen Sensor und Messobjekt.



**Abb. 1:** Prinzipdarstellung der *NMM-5D*: 1 – Spiegelecke der *NMM-1*; 2 – x-Interferometer; 3 – metrologischer Rahmen; 4 – Fundament; 5 – Kraftrahmen; 6 – Drehtisch (Rotation um  $\Theta$ ); 7 – Goniometer (Rotation um  $\varphi$ ); 8 – Fabry-Pérot-Interferometer; 9 – Referenzhemisphäre; 10 – Sensor; 11 – Messobjekt.

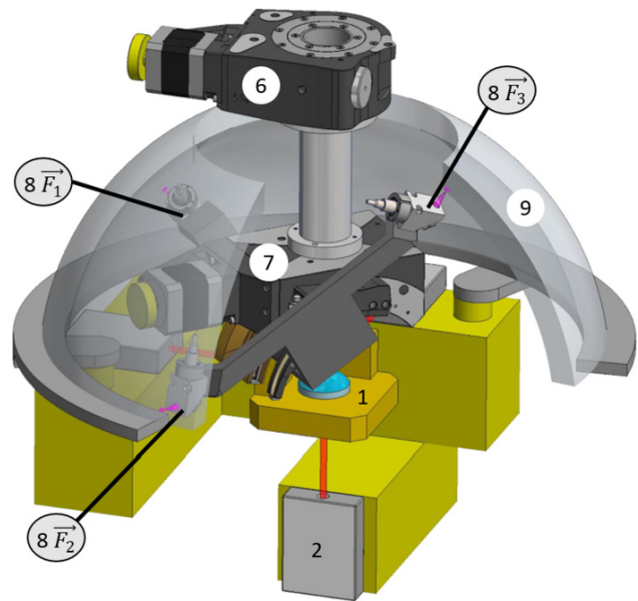
### 3.1 Kinematisches Konzept

Das Rotationssystem besteht aus zwei unabhängigen, motorisierten Rotationspositionierern deren Drehachsen sich ebenfalls im Abbe-Punkt schneiden. Diese beiden Rotationspositionierer sind seriell angeordnet und an dem Letzten ist der Sensor befestigt (siehe Abbildung 1; Teil 6 und 7). Bei dem ersten Rotationspositionierer handelt es sich um einen wälzgelagerten Drehtisch mit Schrittmotor und Rotationsencoder [11]. Die zweite Positionierer ist ein wälzgelagertes Goniometer mit Schrittmotor und Rotationsencoder [12]. Ein Goniometer hat keine geschlossene Führungsbahn und erlaubt daher nur eine diskontinuierliche Bewegung in einem Bereich von  $-45^\circ$  bis  $+45^\circ$ . Der Sensor wird so an dem Goniometer befestigt, dass der Antastpunkt des Sensors im Schnittpunkt der beiden Rotationsachsen liegt. So wird das Abbe-Komparatorprinzip weiterhin strikt eingehalten.

Der Antastpunkt erfährt ausschließlich eine Änderung seiner Ausrichtung, jedoch keine Verschiebung. Somit wird das Messvolumen der *NMM-1* nicht eingeschränkt. Die Ausrichtung des Sensors wird in Kugelkoordinaten mit dem Azimutwinkel ( $\varphi$ ) und dem Polarwinkel ( $\Theta$ ) beschrieben. Da die beiden Drehachsen immer senkrecht aufeinander stehen, können sowohl der Polarwinkel als auch der Azimutwinkel unabhängig voneinander vorgegeben werden. Grundsätzlich kann mit diesem kinematischen Aufbau eine Ausrichtung von  $\varphi = 0^\circ$ – $90^\circ$  für den Azimutwinkel und  $\Theta = 0^\circ$ – $360^\circ$  für den Polarwinkel erreicht werden. Auf Grund von Begebenheiten im Bauraum der bestehenden *NMM-1* wird der Bewegungsbereich auf  $\varphi = 0^\circ$ – $60^\circ$  eingeschränkt [13, 14].

### 3.2 In-Situ-Messsystem

Auf Grund der unvermeidbar auftretenden Führungsabweichungen und der nicht perfekten Justierung in den verwendeten Positionierern erfährt der Antastpunkt des Sensors eine systematische und eine zufällige Verlagerung [15]. Die systematische Verlagerung entsteht durch systematische Bahnabweichungen im Rahmen der Wiederholbarkeit der Dreheinheiten, sowie eine unzulängliche Ausrichtung zwischen den beiden Rotationsachsen und dem Antastpunkt des Sensors. Zufällige Abweichungen entstehen zum einen im Wälzlager, aber auch durch eine Variation verschiedener Störgrößen, wie der Temperatur, die nicht in einem Modell abgebildet werden können. Diese unbekannte Verlagerung des Antastpunktes geht direkt in die erreichbare Messunsicherheit des Einzelpunktes ein. Messungen haben gezeigt, dass diese Abwei-



**Abb. 2:** Vereinfachtes 3D Modell der *NMM-5D*. Beschriftung analog zu Abbildung 1. 1 – Spiegelecke mit Messobjekt; 2 – Z-Interferometer; 6 – Drehtisch ( $\Theta$ ); 7 – Goniometer ( $\varphi$ ); 8 – Fabry-Pérot-Interferometer; 9 – Referenzhemisphäre.

chung in der Größenordnung einiger  $10\ \mu\text{m}$  liegen können [15]. Grundsätzlich kann diese Abweichung im Messprozess durch ein zusammensetzen benachbarter Segmente der Messung durch Stitching vermindert werden. Die Resultate dieser Techniken sind jedoch stark von der zu untersuchenden Oberfläche, wie auch von der Geometrie und der Messaufgabe abhängig. Nicht kontinuierliche Flächen, die keine kontinuierliche Messung erlauben, können nicht durch Stitching gemessen werden.

#### 3.2.1 Messverfahren

Zur Bestimmung des Antastpunktes wird ein in-situ-Referenzmesssystem verwendet, das die Bestimmung des Antastpunktes über den vollständigen Bewegungsbereich ermöglicht. Das Messsystem besteht im Wesentlichen aus drei Abstandsensoren, die fest mit dem Antastsensor verbunden sind und den Abstand zu einer ortsfesten Referenzfläche messen. Die drei Sensoren spannen dabei ein kartesisches Koordinatensystem  $\langle \vec{F}_1, \vec{F}_2, \vec{F}_3 \rangle$  mit dem Ursprung im Antastpunkt des Sensors und damit im Abbe-Punkt auf. Als Referenzfläche wird eine oben geöffnete Hemisphäre mit einem Durchmesser von 400 mm aus Quarzglas verwendet. Erfährt der Sensor eine Verlagerung in Folge von zufälligen oder systematischen Effekten, wird diese durch die drei Sensoren erfasst (siehe Abbildung 2) [16].

Als Sensoren kommen fasergekoppelte Fabry-Pérot-Interferometer zum Einsatz. Diese zeichnen sich durch eine sehr kompakte Bauform und geringes Gewicht aus. Die Interferometer werden auf die Referenzfläche mit einer Brennweite von  $f = 40$  mm fokussiert. Da in einem Fabry-Pérot-Interferometer nur die Reflektion am Faseraustritt für die Interferenz zur Verfügung steht, kann die Referenzfläche ohne eine zusätzliche, reflektierende Beschichtung verwendet werden. Dies erhöht den Interferenzkontrast und reduziert die zu erwartende Messunsicherheit. In Abbildung 1 ist das Gesamtprinzip in 2D dargestellt. Abbildung 2 zeigt ein 3D Modell des Messkreises der NMM-5D.

### 3.2.2 Lage des bewegten Koordinatensystems

Die Ausgangslage des Koordinatensystems  $\langle \vec{F}_1, \vec{F}_2, \vec{F}_3 \rangle$  des Referenzmesssystems kann durch Rotation um die Koordinatenachsen des Maschinenkoordinatensystems  $\langle \vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z \rangle$  gewonnen werden. Dabei ist  $R_x(\alpha)$  die Rotationsmatrix um die x-Achse,  $R_y(\beta)$  die Rotationsmatrix um die y-Achse und  $R_z(\gamma)$  die Rotationsmatrix um die z-Achse. Es ergibt sich somit für die Ausgangslage der Basisvektoren  $\langle \vec{F}_1, \vec{F}_2, \vec{F}_3 \rangle$ :

$$\begin{aligned}\vec{F}_1 &= R_x(\alpha) \cdot R_y(\beta) \cdot R_z(\gamma) \vec{e}_x \\ \vec{F}_2 &= R_x(\alpha) \cdot R_y(\beta) \cdot R_z(\gamma) \vec{e}_y \\ \vec{F}_3 &= R_x(\alpha) \cdot R_y(\beta) \cdot R_z(\gamma) \vec{e}_z\end{aligned}\quad (1)$$

Das von den Fabry-Pérot-Interferometern aufgespannte Koordinatensystem ist ein bewegliches Koordinatensystem, dessen Lage durch die Aktorstellung des Drehtisches und des Goniometers bestimmt wird. Dabei erzeugt der Drehtisch eine Rotation  $R_z(\Theta)$  um die  $e_z$ -Achse und das Goniometer eine Rotation  $R_z(\varphi)$  um die  $e_y$ -Achse. Es ergibt sich für die Basisvektoren des  $\langle \vec{F}_1, \vec{F}_2, \vec{F}_3 \rangle$  Koordinatensystem in Abhängigkeit von  $\Theta$  und  $\varphi$ :

$$\begin{aligned}\vec{F}_1 &= R_z(\Theta) R_y(\varphi) R_x(\alpha_0) R_z(\gamma_0) \vec{e}_x \\ \vec{F}_2 &= R_z(\Theta) R_y(\varphi) R_x(\alpha_0) R_z(\gamma_0) \vec{e}_y \\ \vec{F}_3 &= R_z(\Theta) R_y(\varphi) R_x(\alpha_0) R_z(\gamma_0) \vec{e}_z\end{aligned}\quad (2)$$

Um die wirtschaftlichen und technologischen Herausforderungen bei der Beschaffung und Herstellung der Referenzhemisphäre minimal zu halten, kann die Ausgangslage des Koordinatensystems so gewählt werden, dass der benötigte Ausschnitt der Referenzsphäre für den Bewegungsbereich von  $\gamma = 0^\circ - 60^\circ$  optimiert wird. Das Koordinatensystem des in-situ-Referenzmesssystems ist im Vergleich zum Maschinenkoordinatensystem um  $\gamma_0 = 45^\circ$

um die  $e_z$ -Achse und um  $\alpha_0 = 50^\circ$  um die  $e_x$ -Achse rotiert. Mit Gleichung (2) können die von den Fabry-Pérot-Interferometern überstrichenen Flächen bestimmt werden. Mit dieser Ausgangslage wird bei vollständiger Ausnutzung des Bewegungsbereichs die in Abbildung 3 grau dargestellte Fläche sowohl vom  $\vec{F}_1$ - als auch vom  $\vec{F}_2$  Interferometer überstrichen. Das  $\vec{F}_3$  Interferometer überstreicht dabei die rot dargestellte Fläche. Diese Flächen stellen gleichzeitig die minimal notwendige Fläche der Referenzhemisphäre dar.

### 3.2.3 Bestimmung der Gesamtverschiebung

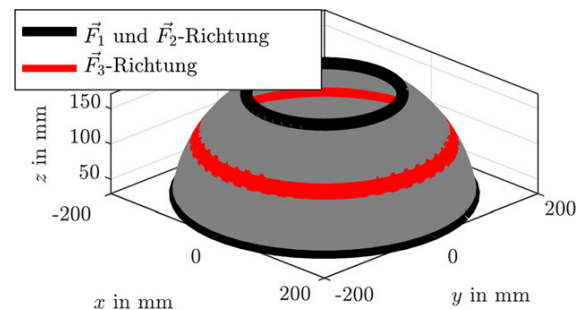
Mit Hilfe von Gleichung (2) kann die im  $\langle \vec{F}_1, \vec{F}_2, \vec{F}_3 \rangle$  gemessene Gesamtverschiebung  $V_{xyz}^{\vec{}}$  bestimmt werden. Dabei sind  $f_1, f_2$  und  $f_3$  die von den Fabry-Pérot-Interferometern gemessenen Verschiebung relativ zur Referenzhemisphäre. Es ergibt sich demzufolge die Gesamtverschiebung  $V_{xyz}^{\vec{}}$  im Maschinenkoordinatensystem:

$$V_{xyz}^{\vec{}} = f_1 \vec{F}_1 + f_2 \vec{F}_2 + f_3 \vec{F}_3$$

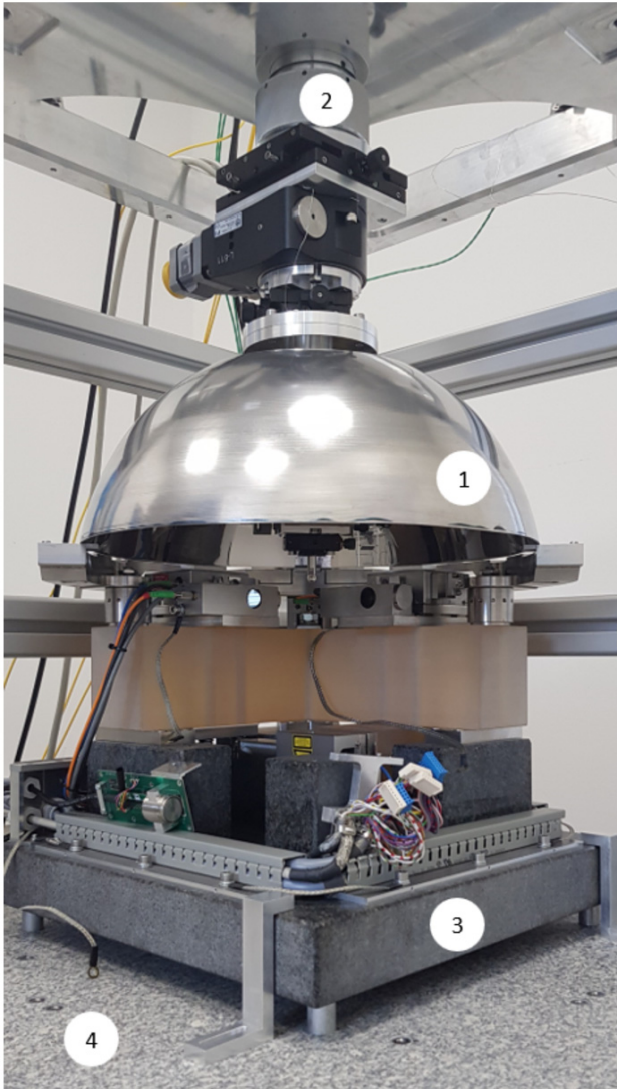
Die so bestimmten Verschiebungen des Fabry-Pérot-Koordinatensystems gelten auch für den starr damit verbundenen Sensor zur Antastung der Oberfläche und werden so zur Korrektur der Antastpunktposition verwendet.

## 3.3 Versuchsaufbau

Passend zu dem vorgestellten Konzept wurde ein praktischer Versuchsaufbau realisiert. Abbildung 4 zeigt den mechanischen Aufbau des Gesamtsystems. Aus ökonomischen Gründen wird die Referenzhemisphäre aus tiefgezogenem Edelstahl gefertigt. Die Reflektionseigenschaften



**Abb. 3:** Von den Fabry-Pérot-Interferometern bei vollständiger Ausnutzung des Bewegungsbereichs überstrichene Fläche der Referenzhemisphäre.



**Abb. 4:** Laboraufbau der NMM-5D mit Referenzhemisphäre aus tiefgezogenem Edelstahl. 1 – Referenzhemisphäre; 2 – Justage Einheit; 3 – NMM-1; 4 – Granitfundament.

werden auf der Innenseite mit einem manuellen Polierverfahren erreicht. Da die Formabweichungen der Referenzhemisphäre zum Erreichen von Unsicherheiten im Nanometerbereich kalibriert werden müssen, ist die Amplitude dieser Formabweichung vernachlässigbar, solange die Messung durch die Fabry-Pérot-Interferometer nicht negativ beeinflusst wird.

### 3.3.1 Metrologischer Rahmen und Werkstoffe

Mit der Erweiterung der *NMM-1* zur *NMM-5D* wird die strikte Trennung der Antriebssysteme vom metrologischen Kreis aufrechterhalten. Man unterscheidet dabei zwischen

dem metrologischen Rahmen und dem Kraftrahmen. Dabei bildet die bisherige *NMM-1* zusammen mit der Referenzhemisphäre den statischen Teil des metrologischen Rahmens und der Interferometer-Träger (siehe Bild 2) bildet zusammen mit den Interferometern und der Sensoraufnahme den bewegten Teil des metrologischen Rahmens. Um den hohen Anforderungen an die Temperaturstabilität gerecht zu werden, werden alle Elemente des metrologischen Kreises aus Invar (mit einem thermischen Ausdehnungskoeffizienten von  $\alpha = 0.5 \times 10^{-6} \text{ m m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ) hergestellt. In den Kraftrahmen werden alle durch die Positionierung entstehenden Kräfte eingeleitet. Durch diese Trennung sinken die Anforderungen an die Konstruktionswerkstoffe für den Kraft Rahmen, die Langzeitstabilität der Justage-Stellen und die Führungsabweichungen der verwendeten Rotationseinheiten. Die dort auftretenden Abweichungen werden vollständig durch das in-situ-Referenzmesssystem erfasst.

### 3.3.2 Mechanischer Aufbau

Die gemeinsame Basis für das Gesamtsystem bildet ein luftgedämpftes Granitfundament in den Abmessungen  $1 \text{ m} \times 1 \text{ m} \times 0.2 \text{ m}$  mit einer Masse von 500 kg. Mit diesem ist sowohl der metrologische Rahmen als auch der Kraft Rahmen verbunden (siehe Abbildung 1).

Die Referenzhemisphäre wird in drei translatorischen Freiheiten justierbar mit dem bisherigen metrologischen Rahmen der *NMM-1* verbunden und so justiert, dass sich ihr Mittelpunkt im ABBE-Punkt der *NMM-1* befindet. Der äußerer Kraft Rahmen trägt die beiden Rotationseinheiten und fixiert diese unter der Referenzhemisphäre. Der Kraftrahmen besteht im Wesentlichen aus steifen Aluminium Konstruktionsprofilen, die eine topologieoptimierte Deckplatte tragen. Durch eine Justage-Baugruppe können sowohl die Rotationsachsen der beiden Positioniersysteme selbst zum Schnitt gebracht werden, also auch gemeinsam in den ABBE-Punkt verschoben werden.

## 4 Messunsicherheit

Die Beschreibung der Messunsicherheit nach dem Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM) [17] ist eine wesentliche Notwendigkeit bei der Entwicklung, Beschreibung und Qualifizierung eines neuartigen Versuchsaufbaus. Dabei ist die Modellbildung für ein komplexes technisches System die größte Herausforderung. Für die in drei translatorischen Freiheiten arbeiten-

de *NMM-1*, konnte die Messunsicherheit systematisch mit Hilfe einer vektoriellen Zerlegung der einzelnen Einflussgrößen erfolgen 2.2.

Das Modell der *NMM-5D* teilt sich dabei in die folgenden Untermodelle auf:

- Koordinatentransformationsmodell
- Orthogonalitätsmodell des Koordinatensystems
- Fabry-Pérot-Interferometer Modell
- Abbe-Abweichungs-Modell
- Formabweichungen der Referenzhemisphäre

Dabei ist in dieser Veröffentlichung die Betrachtung auf das Koordinatentransformationsmodell und dem Orthogonalitätsmodell beschränkt. Die Betrachtungen zum Fabry-Pérot-Interferometer Modell können der Literatur entnommen werden [18]. Die weiteren Modelle werden in dieser Veröffentlichung nicht näher beschrieben, da die notwendigen experimentellen Daten zum Zeitpunkt der Veröffentlichung noch nicht vorliegen. Für die beiden genannten Modelle können auf Grund von experimentellen Daten bereits Abschätzungen der Messunsicherheit angegeben werden.

**Bemerkung.** Die in Abschnitt 4 angestellten Berechnungen erfolgen mit dem Python Package GUM Tree des Neuseeländischen Metrologieinstituts (MSL) [19].

## 4.1 Koordinatentransformationsmodell

Wie im Abschnitt 3.2.2 beschrieben, müssen die mittels des in-situ-Referenzmesssystems gemessenen Bahnabweichungen in das Maschinenkoordinatensystem transformiert werden. Auf Grund der unsicheren Ursprungslage ( $\alpha_0$  und  $\gamma_0$ ) des Gesamtsystems und den Abweichungsbehafteten Drehwinkeln ( $\Theta$  und  $\varphi$ ) ergibt sich eine Unsicherheit bei der Rücktransformation der im bewegten Koordinatensystem  $\langle \vec{F}_1, \vec{F}_2, \vec{F}_3 \rangle$  gemessenen Verschiebungen in das Maschinenkoordinatensystem  $\langle \vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z \rangle$ .

Da zum aktuellen Zeitpunkt der Veröffentlichung noch keine Verschiebungen vorliegen wird eine virtuelle Verschiebung des Antastpunktes in Maschinenkoordinaten  $x_i$ ,  $y_i$  und  $z_i$  von

$$x_i = y_i = z_i = 30 \mu\text{m}$$

in eine Verschiebung entlang der Messachsen der Fabry-Pérot-Interferometer ( $f_{F1i}$ ,  $f_{F2i}$  und  $f_{F3i}$ ) umgerechnet. Dazu werden die unsicherheitsfreien Transformationsmatrizen aus Gleichung (2) verwendet.

Anschließend erfolgt die Rücktransformation mit den unsicherheitsbehafteten Drehwinkeln der Transformationsmatrizen. Die Unsicherheiten für die Winkellage des

**Tab. 1:** Messunsicherheitsbudget des Untermodells zur Beschreibung der Koordinatentransformation aus dem rotierenden Koordinatensystem  $\langle \vec{F}_1, \vec{F}_2, \vec{F}_3 \rangle$  in das  $\langle \vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z \rangle$  Maschinenkoordinatensystem für die Antastpunktverschiebung  $x_F$ .

| Eingangsgröße                           | Wert                  | Unsicherheit $u_i$   | $\frac{\partial L}{\partial x_i} u_i$ | Beitrag |
|---|-----------------------|----------------------|---------------------------------------|---------|
| $f_{F1i}$                               | -17.019 $\mu\text{m}$ | 0 $\mu\text{m}$      | -                                     | -       |
| $f_{F2i}$                               | 12.084 $\mu\text{m}$  | 0 $\mu\text{m}$      | -                                     | -       |
| $f_{F3i}$                               | 47.585 $\mu\text{m}$  | 0 $\mu\text{m}$      | -                                     | -       |
| $\alpha_0$                              | 55°                   | 100 $\mu\text{rad}$  | 2.5 nm                                | 88 %    |
| $\gamma_0$                              | 45°                   | 100 $\mu\text{rad}$  | 0.8 nm                                | 9.6 %   |
| $\Theta$                                | 150°                  | 17.5 $\mu\text{rad}$ | 0.3 nm                                | 1.3 %   |
| $\varphi$                               | 20°                   | 17.5 $\mu\text{rad}$ | 0.3 nm                                | 1.1 %   |
| $x_F = 30.000(3) \mu\text{m} (k = 1)$   |                       |                      |                                       |         |
| $[y_F = 30.000(2) \mu\text{m} (k = 1)]$ |                       |                      |                                       |         |
| $[z_F = 30.000(5) \mu\text{m} (k = 1)]$ |                       |                      |                                       |         |

bewegten Koordinatensystems können für die Rotationssysteme ( $\Theta$ ,  $\varphi$ ) aus Voruntersuchungen und für die Ausgangslage ( $\alpha_0$ ,  $\gamma_0$ ) durch eine Analyse von Form und Lagetoleranzen gewonnen werden. Es ergibt sich eine Messunsicherheit der Verschiebung des Antastpunktes  $x_F$  von 3 nm ( $k = 1$ ). In Tabelle 1 ist das Messunsicherheitsbudget mit allen Eingangsgrößen und Unsicherheiten dargestellt.

**Bemerkung.** Die hier angegebenen Messunsicherheiten gelten nur für eine bestimmte Winkellage des Gesamtsystems und sind für jede Winkellage separat zu berechnen. Auf Grund der zu erwartenden sehr kleinen Verschiebungen des Antastpunktes sind die Einflüsse auf die Gesamtunsicherheit vergleichsweise gering.

### 4.1.1 Bestimmung der Gesamtlänge

Die Bestimmung der Länge des Gesamtvektors  $|\vec{V}_{xyz}|$  wie im Unsicherheitsmodell der NMM-1 durch Betragsbildung des Verschiebungsvektors ist hier nicht sinnvoll, da die Rotation keinen Einfluss auf die Länge eines Vektors hat und somit werden die partiellen Ableitungen zu Null und der Messunsicherheitseinfluss der Rotation wird ebenfalls zu Null.

## 4.2 Orthogonalitätsmodell des Koordinatensystems

Das von den Basisvektoren  $\langle \vec{F}_1, \vec{F}_2, \vec{F}_3 \rangle$  des Referenzmesssystem aufgespannte Koordinatensystem weist Abweichungen vom idealen kartesischen Koordinatensystem

auf. Sind die Winkel zwischen den Basisvektoren ungleich  $90^\circ$ ,

$$\varphi_{12} \neq \varphi_{23} \neq \varphi_{13} \neq 90^\circ \quad (3)$$

ergibt sich das schiefwinklige Koordinatensystem  $\langle \vec{F}_{1S}, \vec{F}_{2S}, \vec{F}_{3S} \rangle$ . Dabei ist  $\varphi_{12}$  der Winkel zwischen  $\vec{F}_1$  und  $\vec{F}_2$ ,  $\varphi_{23}$  der Winkel zwischen  $\vec{F}_2$  und  $\vec{F}_3$  und  $\varphi_{13}$  der Winkel zwischen  $\vec{F}_1$  und  $\vec{F}_3$ . Diese Abweichungen können analog zu den Betrachtungen am nicht orthogonalen Messspiegel der NMM-1 bzw. NPMM-200 aus übernommen werden [20]. Die Transformationsmatrix für die Umrechnung von Basisvektoren des orthogonalen Koordinatensystems in die Vektoren des schiefwinkligen Koordinatensystems können Gleichung (4) entnommen werden.

$$A = \begin{pmatrix} \frac{\sin(\varphi_{23})}{\sqrt{C}} & \frac{\cos(\varphi_{13})\cos(\varphi_{23}) - \cos(\varphi_{12})}{\sin(\varphi_{23})\sqrt{C}} & \frac{\cos(\varphi_{12})\cos(\varphi_{23}) - \cos(\varphi_{13})}{\sin(\varphi_{23})\sqrt{C}} \\ 0 & \frac{1}{\sin(\varphi_{23})} & -\frac{\cos(\varphi_{23})}{\sin(\varphi_{23})} \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

mit:

$$C = 1 + 2 \cos(\varphi_{12}) \cos(\varphi_{13}) \cos(\varphi_{23}) - \cos(\varphi_{12})^2 - \cos(\varphi_{13})^2 - \cos(\varphi_{23})^2 \quad (5)$$

Um das schiefwinklige Koordinatensystem zu berechnen wird das Mit Hilfe der Gleichung 4 ein schiefwinkliges Koordinatensystem  $\langle \vec{e}_{xu}, \vec{e}_{yu}, \vec{e}_{zu} \rangle$  aus dem Basiskoordinatensystem  $\langle \vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z \rangle$  berechnet. Es ergibt sich der folgende Zusammenhang für die Transformation:

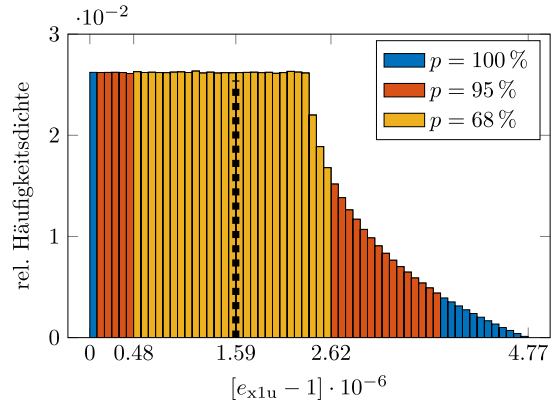
$$\vec{e}_{xu} = A\vec{e}_x \quad \vec{e}_{yu} = A\vec{e}_y \quad \vec{e}_{zu} = A\vec{e}_z \quad (6)$$

Die Transformationsmatrix (4) gilt für den Fall, dass die Vektoren des orthogonalen Koordinatensystems und des schiefwinkligen Koordinatensystem in  $\vec{e}_z$  Richtung aufeinander liegen. Es gilt:  $\vec{e}_z = \vec{e}_{zs}$ .

Die tatsächliche Schiefwinkeligkeit zwischen den Basisvektoren muss abgeschätzt werden. Ein direktes Messen ist nicht möglich, da die Basisvektoren physisch durch die Strahlausbreitungsrichtung der Fabry-Pérot-Interferometer definiert werden. Ohne weitere Kenntnisse wird eine Abweichung von

$$\Delta\varphi_{12} = \Delta\varphi_{23} = \Delta\varphi_{13} = 0^\circ$$

mit einer Unsicherheit von  $u = 1.2 \text{ mrad}$  angenommen. Da für eine zu erwartende Winkelabweichung von  $0^\circ$  die Transformationsmatrix (4) mit der Einheitsmatrix übereinstimmt, werden die partiellen Ableitungen zu null. Zusammen mit der stark nichtlinearen Abhängigkeit der Basisvektoren von den Winkelabweichungen wird die Anwendung der Monte Carlo Simulation zur Bestimmung der Unsicherheit entsprechend dem GUM Supplement 1 [21] notwendig.



**Abb. 5:** Histogramm der Komponente  $e_{x1u}$  des Basisvektors  $\vec{e}_x$  in Folge eines schiefwinkligen Koordinatensystems, ermittelt mit einer Monte Carlo Simulation mit  $n = 1 \times 10^8$  Wiederholungen.

#### 4.2.1 Monte Carlo Simulation

Die Bestimmung der Unsicherheiten erfolgt mit Hilfe einer Monte Carlo Simulation auf Basis der oben genannten Eingangsgrößen. Die Betrachtungen erfolgen für alle drei Basisvektoren  $\langle \vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z \rangle$ . Dabei gilt:

$$\vec{e}_{xu} = \begin{pmatrix} e_{x1u} \\ e_{x2u} \\ e_{x3u} \end{pmatrix} \quad (7)$$

Die Simulation erfolgt mit  $n = 1 \times 10^8$  samples. In Abbildung 5 ist die Verteilung der ersten Komponente  $e_{x1u}$  des Basisvektors  $\vec{e}_x$  dargestellt. Zur besseren Skalierung ist der Wert des Einheitsvektors abgezogen und mit dem Faktor  $1 \times 10^{-6}$  skaliert. Es ergibt sich eine einseitige Verteilung mit einem Erwartungswert und Standardunsicherheit von  $e_{x1u} = 1 + [1.59 \pm 0.97] \cdot 10^{-6}$  für eine Überdeckungswahrscheinlichkeit von  $p = 68\%$ . Analog dazu können die verbleibenden Komponenten der unsicheren Basisvektoren ebenfalls mit Hilfe der Monte Carlo Methode bestimmt werden. Es ergeben sich die folgenden Basisvektoren mit ihren Unsicherheiten:

$$\begin{aligned} \vec{e}_{xu} &= \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} [1.59 \pm 0.97] \cdot 10^{-6} \\ 0 \pm 0.0 \\ 0 \pm 0.0 \end{pmatrix} \\ \vec{e}_{yu} &= \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} [-9 \pm 1457] \cdot 10^{-6} \\ [0.8 \pm 0.8] \cdot 10^{-6} \\ 0 \pm 0.0 \end{pmatrix} \\ \vec{e}_{zu} &= \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} [-0.3 \pm 1475.0] \cdot 10^{-6} \\ [-1 \pm 1472] \cdot 10^{-6} \\ 0 \pm 0.0 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (8)$$

Auf Grund der Lage  $\vec{e}_z = \vec{e}_{zs}$  ist die Komponente  $e_{z3u}$  nicht unsicherheitsbehaftet.

**Tab. 2:** Gesamt - Messunsicherheitsbudget für die Positionsbestimmung mit Hilfe des Referenzmesssystems  $X_{\text{Ref}}$ . MC – Monte Carlo, R – Rechteckverteilung.

| Größe   | Wert                  | Unsicherheit $u_i$   | Vert. | $\frac{\partial L}{\partial x_i} u_i$ | Beitrag |
|---|-----------------------|----------------------|-------|---------------------------------------|---------|
| $e_{z1u}^{\vec{z}}$   | $-0.3 \times 10^{-6}$ | $1.4 \times 10^{-3}$ | MC    | 63.3 nm                               | 88.8 %  |
| $e_{y1u}^{\vec{y}}$   | $-9 \times 10^{-6}$   | $1.4 \times 10^{-3}$ | MC    | 16.0 nm                               | 5.7 %   |
| $e_{z2u}^{\vec{z}}$   | $-1 \times 10^{-6}$   | $1.4 \times 10^{-3}$ | MC    | 13.4 nm                               | 4.0 %   |
| Gesamt:   | 0                     |                      |       |                                       | 98.5 %  |
| $Nl_1$  | 0 nm                  | 7.5 nm               | R     | 7.1 nm                                | 1.1 %   |
| $Nl_3$  | 0 nm                  | 7.5 nm               | R     | 1.8 nm                                | 0.1 %   |
| $Nl_2$  | 0 nm                  | 7.5 nm               | R     | 1.5 nm                                | 0.1 %   |
| Gesamt:   |                       |                      |       |                                       | 1.3 %   |
| $\gamma_0$  | 45°                   | 100 $\mu\text{rad}$  | R     | 1.8 nm                                | 0.1 %   |
| $\alpha_0$  | 55°                   | 100 $\mu\text{rad}$  | R     | 0.7 nm                                | 0.1 %   |
| $f_L$   | 195.8 THz             | 1.1 MHz              | R     | 1.5 nm                                | 0.0 %   |
| $X_{\text{Ref}} = 30.072(71) \mu\text{m} (p = 68\%)$<br>$[Y_{\text{Ref}} = 30.075(40) \mu\text{m} (p = 68\%)]$<br>$[Z_{\text{Ref}} = 32.71(57) \mu\text{m} (p = 68\%)]$ |                       |                      |       |                                       |         |

### 4.3 Gesamt Unsicherheitsmodell

Unter kontrollierten Umweltbedingungen wird die Messunsicherheit der Fabry-Pérot-Interferometern im Wesentlichen von deren Nichtlinearität dominiert. Diese resultieren hauptsächlich aus Doppelreflektionen innerhalb der Fabry-Pérot-Kavität. Auf Grund der geringen Totstrecke, dem Arbeitsabstand zwischen Interferometer und Referenzhemisphäre, wird das Messergebnis durch die Schwankungen der Luftbrechzahl in Folge von nicht stabilen Umweltbedingungen, nicht signifikant beeinflusst. Des Weiteren liefert die Frequenzstabilität  $f_L$  des verwendeten Lasers ebenfalls einen Beitrag [22, 18]. Die Nichtlinearität liegt in einem Bereich von  $\pm 13$  nm, das entspricht unter Annahme einer Rechteckverteilung einer Standardunsicherheit von 7.5 nm [16]. Weiterhin wurde das thermische Verhalten in Folge der unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten nicht berücksichtigt.

Es gilt für die Verschiebung des Antastpunktes auf Grundlage von Gleichung 2:

$$\begin{pmatrix} X_{\text{Ref}} \\ Y_{\text{Ref}} \\ Z_{\text{Ref}} \end{pmatrix} = f_1 \vec{F}_1 + f_2 \vec{F}_2 + f_3 \vec{F}_3 \quad (9)$$

Dabei beinhalten die gemessenen Verschiebungen  $f_1, f_2, f_3$  die Unsicherheiten der Fabry-Pérot-Interferometer. Die Berechnung erfolgt unter der Anwendung der in Abschnitt 4.1 beschriebenen virtuellen Verschiebung von 30  $\mu\text{m}$ . Es ergibt sich für die mit dem Referenzmesssystem der NMM-5D unter Vernachlässigung der Formabweichung der Referenzhemisphäre ermittelte Verschiebung  $X_{\text{Ref}}$ , das in

Tabelle 2 dargestellte Gesamt-Messunsicherheitsbudget. Gleichzeitig sind auch die Erwartungswerte und Standardunsicherheiten für die Verschiebung in y und z Richtung angegeben, dafür ist jedoch die Aufteilung des Budgets nicht gültig.

Es ergibt sich eine Messunsicherheit von 71 nm ( $k = 1$ ,  $p = 68\%$ ) für die Verschiebung in  $e_x^{\vec{x}}$ -Richtung. Die Messunsicherheiten in die anderen Raumrichtungen liegen mit 40 nm in  $e_y^{\vec{y}}$ -Richtung und 57 nm in  $e_z^{\vec{z}}$ -Richtung geringfügig unter der Verschiebung in  $e_x^{\vec{x}}$ -Richtung. Das Messunsicherheitsbudget ist deutlich von den unbekanntem Orthogonalitätsabweichungen des Koordinatensystems dominiert. Dem gegenüber ist der Einfluss der Fabry-Pérot-Interferometer und der Ausrichtung des Koordinatensystems vernachlässigbar klein.

**Bemerkung.** Die in diesem Abschnitt durchgeführten Betrachtungen erfolgen im Wesentlichen unter Verwendung von rechteckverteilten Eingangsgrößen. Dabei handelt es sich um eine konservative Abschätzung und stellt damit eine Abschätzung für den ungünstigsten Fall dar.

## 5 Zusammenfassung

Das hier vorgestellte Konzept für eine fünfsichtige Nanomessmaschine NMM-5D ermöglicht die kontinuierliche Ausrichtung des Sensors orthogonal zur lokalen Probenoberfläche in einem Winkelbereich von  $\varphi = 0^\circ$ – $60^\circ$  und  $\Theta = 0^\circ$ – $360^\circ$ . Die Erweiterung umfasst zwei Rotationseinheiten und ein in-situ-Referenzmesssystem, dass die Position des Antastpunktes interferometrisch relativ zu einer hemisphärischen Referenzfläche ermittelt. Dabei wird das Abbe-Komparatorprinzip für alle Messachsen eingehalten. Zur metrologischen Beschreibung wurde ein vektorielles Unsicherheitsmodell in Anlehnung an die NMM-1 erstellt. Die Betrachtungen daran zeigen, dass die unbekanntem Orthogonalität des Referenzmesssystems zu einer vergleichsweise hohen Messunsicherheit von maximal 72 nm führt, die jedoch im Vergleich zu ähnlichen Systemen [3, 4] durchaus vergleichbar ist.

## 6 Ausblick

Das vorgestellte Konzept für eine fünfsichtige Nanomessmaschine befindet sich momentan im Aufbau. Anhand dieses Versuchsaufbaus werden verschiedene Messstrategien und Sensortypen untersucht. Der bisherige Aufbau



erlaubt auch die Integration von kompakten Fotolithographischen Bearbeitungssystemen [23, 24]. Diese profitieren von den erweiterten Bewegungsmöglichkeiten. Basierend auf diesen Ergebnissen kann ein Konzept für eine eigenständige, fünfachsigige Nanomess- und Nanobearbeitungsmaschine mit fünf Freiheiten entwickelt werden. Die Betrachtungen zur Messunsicherheit zeigen, dass zum Erreichen von einstelligen Messunsicherheiten eine geeignete Methode zur Bestimmung der Orthogonalitätsabweichungen gefunden werden muss.

**Bemerkung.** Auszüge aus dieser Veröffentlichung, sowie Abbildungen wurden in leicht geänderter Form bereits in [25] und [26] veröffentlicht.

**Finanzierung:** 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. Todd Blalock, Kate Medicus, and Jessica DeGroot Nelson. Fabrication of freeform optics. In Oliver W. Föhnle, Ray Williamson, and Dae Wook Kim, editors, *Optical Manufacturing and Testing XI*, SPIE Proceedings, page 95750H. SPIE, 2015.
2. R. Schachtschneider, I. Fortmeier, M. Stavridis, J. Asfour, G. Berger, R. B. Bergmann, A. Beutler, T. Blümel, H. Klawitter, K. Kubo, J. Liebl, F. Löffler, R. Meeß, C. Pruss, D. Ramm, M. Sandner, G. Schneider, M. Wendel, I. Widdershoven, M. Schulz, and C. Elster. Interlaboratory comparison measurements of aspheres. *Measurement Science and Technology*, 29(5):055010, 2018.
3. Rens. Henselmans, L. A. Cacace, G. F. Y. Kramer, P. C. J. N. Rosielle, and M. Steinbuch. The NANOMEFOS non-contact measurement machine for freeform optics. *Precision Engineering*, 35(4):607–624, 2011.
4. Jürgen Petter and Gernot Berger. Non-contact profiling for high precision fast asphere topology measurement. In Peter H. Lehmann, Wolfgang Osten, and Armando Albertazzi, editors, *Optical Measurement Systems for Industrial Inspection VIII*, SPIE Proceedings, page 878819. SPIE, 2013.
5. Gerd Jäger, Eberhard Manske, Tino Hausotte, and Hans-Joachim Büchner. Nanomessmaschine zur abbefehlerfreien Koordinatenmessung (Nano Measuring Machine for Zero Abbe Offset Coordinate-measuring). *tm - Technisches Messen*, 67(7–8), 2000.
6. Tino Hausotte, Gerd Jäger, Robert Schmitt, and Gerald Gerlach. *Nanopositionier- und Nanomessmaschinen*. Pro Business, Berlin, 1. aufl. edition, 2011.
7. Ernst Abbe. Messapparate für Physiker. *Zeitschrift für Instrumentenkunde*, 10:446–448, 1890.
8. H. Büchner and G. Jäger. Interferometrisches Meßverfahren zur berührungslosen und quasi punktförmigen Antastung von Meßoberflächen / Interferometric measuring technique for the contactless and quasi-pointlike scanning of measuring surfaces. *tm - Technisches Messen*, 59(2), 1992.
9. Gerd Jäger, Eberhard Manske, Tino Hausotte, and Hans-Joachim Büchner. The metrological basis and operation of nanopositioning and nanomeasuring machine NMM-1. *tm - Technisches Messen*, 76(5):524, 2009.
10. Roland Füßl, Rainer Grünwald, and Ingomar Schmidt. Messunsicherheitsanalyse von Nanopositionier- und Nanomessmaschinen mit Hilfe eines neuen vektoriiellen Modellansatzes. *Technisches Messen*, 73(9):465–471, 2006.
11. Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. KG. Präzisions-Rotationstisch L-611: Datenblatt, 2018.
12. Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. KG. Motorisiertes Präzisions-Goniometer WT-90: Datenblatt, 2018.
13. Florian Fern, Roland Füßl, and Ralf Schienbein. Influence of additional rotational movements on the measurement uncertainty of nanomeasuring, nanopositioning and nanofabrication machines. In *Sensoren und Messsysteme*, pages 168–171. VDE Verlag GmbH, Berlin, 2018.
14. Ralf Schienbein, Florian Fern, Florian Weigert, René Theska, and Roland 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*, pages 65–66. euspens, Bedford, UK, 2018.
15. Florian Fern, Ralf Schienbein, Roland Füßl, and René Theska. Ultra precise motion error measurement of rotation kinematics for the integration in nanomeasuring and nanofabrication machines. In *Proceeding 33rd ASPE Annual Meeting*, 2018.
16. Florian Fern, Ralf Schienbein, René Theska, Roland Füßl, Michael Kühnel, Laura Weidenfeller, and 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. *tm - Technisches Messen*, 86(s1):77–81, 2019.
17. BIPM. *Evaluation of measurement Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement: JCGM 100:2008*. 2008.
18. Klaus Thurner, Francesca Paola Quacquarelli, Pierre-François Braun, Claudio Dal Savio, and Khaled Karrai. Fiber-based distance sensing interferometry. *Applied Optics*, 54(10):3051–3063, 2015.
19. Blair Hall and Joseph Borbely. GUM Tree Calculator Documentation: Release 1.2.0, 2019.
20. Florian Fern, Roland Füßl, Gabriele Eichfelder, Eberhard Manske, and M. Kühnel. Coordinate transformation and its uncertainty under consideration of a non orthogonal coordinate base. *Measurement Science and Technology*, 2020.
21. BIPM. *Evaluation of measurement data — Supplement 1 to the “Guide to the expression of uncertainty in measurement” — Propagation of distributions using a Monte Carlo method: JCGM 101:2008*. 2008.
22. Klaus Thurner. *Position sensing using a fiber-optic Fabry-Pérot interferometer*. Universitätsbibliothek der TU München, München, 2018.

23. M. Kühnel, Thomas Fröhlich, Roland Füßl, Martin Hoffmann, Eberhard Manske, Ivo W. Rangelow, Johann Reger, Christoph Schäffel, Stefan Sinzinger, and Jens-Peter Zöllner. Towards alternative 3D nanofabrication in macroscopic working volumes. *Measurement Science and Technology*, 2018.
24. Johannes Kirchner, Rostyslav Mastylo, Uwe Gerhardt, Florian Fern, Laura Weidenfeller, Taras Sasiuk, Eberhard Manske, Ralf Schienbein, Martin Hofmann, and Stefan Sinzinger. Anwendungen eines fasergekoppelten chromatisch konfokalen Sensors in Nanopositionier- und Nanomessmaschinen / Applications of a fiber coupled chromatic confocal sensor in nanopositioning and nanomeasuring machines. *tm - Technisches Messen*, 86(s1):17–21, 2019.
25. Florian Fern, Roland Füßl, and Ralf Schienbein. Neues Konzept für eine fünfsichtige Nanomessmaschine. In *Messunsicherheit - Prüfprozesse 2019*, VDI-Berichte, 2019.
26. Florian Fern. *Metrologie in fünfsichtigen Nanomess- und Nanopositioniermaschinen*. PhD thesis, Ilmenau, 2020.

forschungsbereich “Nanopositionier- und Nanomessmaschinen” und seit 2017 ist er Projektleiter im Graduiertenkolleg “Spitzen- und laserbasierte 3D-Nanofabrikation in erweiterten makroskopischen Arbeitsbereichen”. Sein Forschungsschwerpunkt liegt auf dem Gebiet der Metrologie in den Nanopositionier- Nanomess- und Nanofabrikationstechnologien.



**Eberhard Manske**

Technische Universität Ilmenau, Institute of Process Measurement and Sensor Technology, Ilmenau, Germany  
 eberhard.manske@tu-ilmenau.de

Eberhard Manske erhielt 1982 das Diplom in Elektrotechnik an der Technischen Universität Ilmenau. Er promovierte 1986 und habilitierte sich 2006 auf dem Gebiet der Präzisionsmesstechnik. Seit 2008 hat er eine Professur “Fertigungs- und Präzisionsmesstechnik” an der Technischen Universität Ilmenau inne. Von 2008 bis 2013 war er Sprecher des Sonderforschungsbereichs “Nanopositionier- und Nanomessmaschinen (SFB 622)” und seit 2017 leitet er das Graduiertenkolleg “Spitzen- und laserbasierte 3D-Nanofabrikation in erweiterten makroskopischen Arbeitsbereichen (NanoFab)”, beides gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft. Seine Forschungsaktivitäten liegen insbesondere in der Entwicklung von Nanopositionier- und Nanomessmaschinen mit den Schwerpunkten hochpräzise Laserinterferometrie, Laserstabilisierung, Frequenzkammtechnik, optische und taktile Nanosensoren und Rastersondenverfahren.

## Autoreninformationen



**Florian Fern**

Technische Universität Ilmenau, Institute of Process Measurement and Sensor Technology, Ilmenau, Germany  
 florian.fern@tu-ilmenau.de

Florian Fern studierte von 2012 bis 2017 an der Technischen Universität Ilmenau Maschinenbau. Von 2017 bis 2020 war er wissenschaftlicher Mitarbeiter der Technischen Universität Ilmenau am Institut für Prozessmess- und Sensortechnik und promovierte zu dem Thema “Metrologie in fünfsichtigen Nanomess- und Nanopositioniermaschinen”. Seit 2020 ist er wissenschaftlicher Mitarbeiter bei der JUMO GmbH & Co. KG im Bereich Mess- und Regeltechnik.



**Roland Füßl**

Technische Universität Ilmenau, Institute of Process Measurement and Sensor Technology, Ilmenau, Germany  
 roland.fuessl@tu-ilmenau.de

Roland Füßl erhielt 1981 das Diplom im Fachgebiet Technische Kybernetik und Automatisierungstechnik an der Technischen Hochschule Ilmenau. Er promovierte 1986 und habilitierte 2008 auf dem Gebiet der Prozessmesstechnik. Von 2008 bis 2014 arbeitete er als Privatdozent an der Technischen Universität Ilmenau. Im Jahr 2014 erfolgte die Ernennung zum außerplanmäßigen Professor an der TU Ilmenau. Von 2003 bis 2013 war er Teilprojektleiter im Sonder-