Nataliya Vorbringer-Dorozhovets*, Eberhard Manske und Gerd Jäger

Interferometrisches Rasterkraftmikroskop: Aufbau, messtechnische Eigenschaften und Applikationsmessungen

Interferometric atomic force microscope: design, metrological properties and application measurements

DOI 10.1515/teme-2018-0023

Zusammenfassung: Der vorliegende Beitrag stellt die besonderen Merkmale, die Funktionsweise, den Aufbau, die messtechnischen Eigenschaften sowie wichtige Applikationsmessungen des interferometrischen Rasterkraftmikroskops dar. Das interferometrische Rasterkraftmikroskop dient als Antastsystem in der Nanopositionier- und Nanomessmaschine NMM-1. Sein Hauptmerkmal ist der Lagedetektor – das kombinierte Sondenmesssystem, das die gleichzeitige Erfassung der Torsion, Biegung und Position des Cantilevers mittels Lichtzeiger und Interferometer ermöglicht. Es wird das Prinzip der gleichzeitigen Erfassung von Position und Winkellage der Sonde mittels eines Interferometers und eines Lichtzeigers erläutert, die optische Anordnung vorgestellt und anschließend die durchgeführte Dimensionierung des Lagedetektors diskutiert. Außerdem widmet sich dieser Beitrag neben den messtechnischen Eigenschaften des interferometrischen Rasterkraftmikroskops auch der Kalibrierung des Antastsystems und insbesondere der Unsicherheitsanalyse einer Beispielmessung.

Schlüsselwörter: Interferometrisches Rasterkraftmikroskop, kombiniertes Sondenmesssystem, Unsicherheitsanalyse.

Abstract: This article presents the special properties, operating mode, design, metrological properties, important application measurements of the interferometric atomic force microscope. The interferometric atomic force microscope serves as a probing system in the nanopositioning and nanomeasuring machine NMM-1. The main feature of the interferometric atomic force microscope is the position detector – the combined probe measuring system, which allows the simultaneous detection of torsion, bending and position of the cantilever by means of optical lever and

interferometer. In this work the principle of simultaneous detection of vertical and angular position of the probe by means of an interferometer and an optical lever is explained, the optical arrangement is presented and afterwards the accomplished dimensioning of the position detector is discussed. This article deals also with metrological properties of interferometric atomic force microscope, calibration of its probing system and particularly with the uncertainty analysis of an example measurement.

Keywords: Interferometric atomic force microscope, combined probe measuring system, uncertainty analysis.

1 Einleitung

Seit über dreißig Jahren ermöglicht das Rasterkraftmikroskop (AFM) Einblicke in die Nanowelt. Sein Funktionsprinzip nutzt die lokalen Wechselwirkungen zwischen einer am Ende eines Biegebalkens (Cantilever) montierten Spitze und einer Oberfläche. Durch die Erfassung der Cantileverauslenkung ist es möglich, während einer Oberflächenantastung ihre Topographie aufzunehmen. Somit funktioniert das Rasterkraftmikroskop ähnlich wie ein Plattenspieler. Heutzutage dienen diese Geräte nicht nur der bildlichen Darstellung einer Oberfläche, sondern erlauben hochauflösende Charakterisierungen von Mikro- und Nanostrukturen. Diese spezielle Technik ist besonders wichtig für die Halbleiterindustrie, Biotechnologie, Präzisionstechnik und viele andere Bereiche. Fortschritte in dieser Schlüsseltechnologie erfordern quantitative dimensionelle Messungen mit Nanometergenauigkeit über große Messbereiche.

Durch die Entwicklung einer Nanopositionier- und Nanomessmaschine (NMM-1) [5, 6] mit einer 80 pm Auflösung über einen Positionier- und Messbereich von 25 mm × 25 mm × 5 mm am Institut für Prozessmess- und Sensortechnik der Technischen Universität Ilmenau wurde eine Basis für dimensionelle Messungen über große

*Korrespondenzautor: Nataliya Vorbringer-Dorozhovets, Institut für Prozessmess- und Sensortechnik, Fakultät für Maschinenbau, Technische Universität Ilmenau, PF 100565, D-98684 Ilmenau, E-Mail: nataliya.vorbringer-dorozhovets@tu-ilmenau.de

Bereiche geschaffen. Die Messungen der NMM-1 werden durch die metrologischen Eigenschaften wie Stabilität, Empfindlichkeit, Reproduzierbarkeit und Rauschverhalten des verwendeten Antastsystems stark beeinflusst. Als vor einigen Jahren die NMM-1 entwickelt wurde, existierte noch kein kommerzielles Rasterkraftmikroskop, welches in die Maschine hätte integriert werden können und dabei die metrologischen Anforderungen hätte erfüllen können. Dies war der Ausgangspunkt für die Entwicklung eines interferometrischen Rasterkraftmiroskop [3] als Antastsystem für die NMM-1.

2 Prinzipieller Aufbau und Funktionsweise des interferometrischen Rasterkraftmikroskops

Die Hauptkomponente des interferometrischen Rasterkraftmikroskops ist das eigenentwickelte kombinierte Sondenmesssystem (der Lagedetektor) zur Ermittlung der Auslenkung (Position, Torsion und Biegung bzw. Schwingungsamplitude¹, -phase und -frequenz) des Cantilevers. Das Sondenmesssystem beinhaltet einen Lichtzeiger und ein Interferometer (siehe Abb. 1) und ermöglicht somit die gleichzeitige Messung von Biegung, Torsion und Position des Cantilevers [3]. Die theoretisch erreichbare Empfindlichkeit des Lichtzeigers hängt von der Länge L und Breite W des Cantilevers und der Wellenlänge λ des Laserstrahls und beträgt für standardmäßige Contact-Modus Cantilever $\frac{\Delta S}{\Delta z} = \frac{3\pi W}{2\lambda L} \approx 8 \cdot 10^5$. Die theoretische Empfindlichkeit des Interferometers hängt von der Wellenlänge λ des Laserlichts ab und ist fast zehnfach höher: $\frac{\Delta I}{I_0 \Delta z} = \frac{4}{\lambda} \approx 6.3 \cdot 10^6$.

Darüber hinaus verfügt das interferometrische Rasterkraftmikroskop über einen zusätzlichen piezoelektrischen Hochgeschwindigkeitsantrieb (siehe Abb. 1) zur Regelung der Auslenkung des Cantilevers auf konstante Durchbiegung (Biegungssignal wird benutzt) während der Oberflächenantastung [13]. Während der Messungen wird die Kombination der Bewegungen der Spiegelecke der NMM-1 und des Antastsystems benutzt. Der Piezoantrieb führt schnelle Bewegungen um einen Arbeitspunkt in der Mitte seines Stellbereiches von $2\text{ }\mu\text{m}$ aus, um die Auslenkung

Abb. 1: Optische Anordnung des Lagedetektors (1 Lichtwellenleiter, 2 Kollimator f_k , 3 Interferometerteiler, 4 Strahlteiler, 5 Fokussierlinse f , 6 Cantilever mit Antastspitze, 7 piezoelektrischer Hochgeschwindigkeitsantrieb, 8 Umlenkprisma, 9 Referenzspiegel, 10 Quadrantendiode, 11 interferometrische Auswerteeinheit, 12 Spiegelecke der NMM-1 mit einem Messobjekt).

des Cantilevers (bzw. die Antastkraft) auf einem konstanten Wert zu halten. Währenddessen ist die NMM-1 für langsame Bewegungen verantwortlich, die Ausschlag des Piezoantriebs wird dabei in der Mitte seines Stellbereiches gehalten [6]. Gleichzeitig wird die Bewegung dieses piezoelektrischen Antriebes mit dem Interferometer des Sondenmesssystems direkt auf dem Cantilever gemessen. Der Einsatz des piezoelektrischen Antriebes ermöglicht Messungen der Strukturen mit einer Höhe von $1\text{ }\mu\text{m}$ und Scangeschwindigkeiten von 1 mm/s [13, 16].

Durch die spezielle kombinierte optische Anordnung wird nur ein Messstrahl benötigt, der auf das freie Ende des Cantilevers fokussiert wird. Der reflektierte Strahl wird geteilt und zu den Auswertungsebenen beider Lage-detektoren geführt. Die Quadrantendioden im Lichtzeiger erfassen die, durch die Auslenkung des Cantilevers und somit Neigungsänderung des freien Ende des Biegebal-kenendes verursachte, Verlagerung p des reflektierenden Lichtstrahls (siehe Abb. 1). Diese Verlagerung führt beim Interferometer zu einer Verringerung der Interferenzin-tensität [1]. Diese Verschlechterung des Interferenzsignals hängt auch vom Durchmesser des Laserstrahls und so-mit von den Brennweiten des Kollimators und der Fo-kussierlinse ab. Durch Auswahl dieser Parameter wer-den Messbereich und Empfindlichkeit des Lichtzeigers so-wie Messbereich und maximal mögliche Strahlauslenkung (bzw. Akzeptanzwinkel) des Interferometer bestimmt. Die

1 Schwingungsamplitude, -phase und -frequenz werden in dynamischen Betriebsarten wie Intermittent-Modus und Non-Contact-Modus benutzt. Im Contact-Modus wird die Biegung und/oder Torsion verwendet.

Abb. 2: Numerisch berechneten Kennlinien des Lichtzeigers in Abhängigkeit von den Brennweiten des Kollimators f_k und der Fokussierlinse f .

Abb. 3: Linearitätsabweichungen der Kennlinien des Lichtzeigers in Abhängigkeit von den Brennweiten des Kollimators f_k und der Fokussierlinse f .

durchgeführten numerischen Berechnungen basieren auf der Gauß'schen Strahlenoptik [2, 8, 10]. Die Strahlparameter wurden bei unterschiedlichen Linsenbrennweiten von der Strahleinkopplung bis zu beiden Auswerteebenen nach jedem Passieren einer Linse berechnet. Die Vergrößerung der Brennweite der Fokussierlinse führt zu Ausweitung des fokussierten Strahldurchmessers auf dem Cantilever und ermöglicht eine höhere Empfindlichkeit der Auslenkungsmessung (vgl. Abb. 2). Allerdings vergrößert sich die Nichtlinearität der Kennlinie des Ausgangssignals des Lichtzeigers (vgl. Abb. 3) und der Abfall der normierten Strahlintensität bei der interferometrischen Auswerteeinheit nimmt zu. Der Einsatz der kürzeren Brennweiten erschwert die Integration der Cantileveraufnahme. Ausgehend von diesen Überlegungen wurde die Fokussierlinse mit einer Brennweite von 40 mm ausgewählt. Die Vergrößerung der Brennweite des Kollimators führt auch zur Erhöhung der Empfindlichkeit der Winkelmessung und Kennliniennichtlinearität (siehe Abb. 2). In Bezug auf die Kollimatorlinse sind Brennweiten im Bereich von 7 bis 11 mm geeignet.

3 Messtechnischen Eigenschaften

Die messtechnischen Eigenschaften des interferometrischen Rasterkraftmikroskops, wie Auflösung, Rauschen, Langzeitstabilität, Reproduzierbarkeit, sind von sehr vielen Faktoren und Komponenten des Gesamtsystems, bestehend aus der NMM-1 und des Antastsystems, abhängig.

Durch die Kalibrierung der weg- (Interferometer) und winkelproportionalen (Lichtzeiger) Ausgangssignale des interferometrischen Rasterkraftmikroskops mit dem z-Inter-

ferometer der NMM-1 werden solche systematische Einflüsse wie die Einbaulage des Antastsystems bzw. Anordnung des Messstrahls des Lagedetektors nicht fluchtend mit der z-Achse der NMM-1, Winkeljustage des Referenzspiegels im Interferometer, Defokussierung und Strahlausbreitung, Winkelabweichung des Messstrahls während der Messung, Einbaulage und Ausrichtung der Quadrantendioden im Lichtzeiger, sowie Justage des Cantilevers berücksichtigt. Weitere wesentliche Einflüsse wie Umweltabhängigkeit der interferometrischen Messung, Temperatur-, Feuchteabhängigkeit und Langzeitstabilität des mechanischen Aufbaus des Antastsystems wurden analysiert.

3.1 Umweltabhängigkeit

Zuerst wurde die Umweltabhängigkeit des Antastsystems experimentell ermittelt. Die Temperaturabhängigkeit des Interferometersignals beträgt ca. 250 nm/K. Ohne Berücksichtigung des Cantilevers und dessen Halterung (Messung an einem Spiegel) verringert sich dieser Wert bis auf ca. 30 nm/K (vgl. Abb. 4). Die Temperaturabhängigkeit der Torsions- und Biegungssignale kann mit ca. 40 mV/K abgeschätzt werden. Dieser Wert ist doppelt so hoch als das Ergebnis der Untersuchung an einem Spiegel anstatt des Cantilever mit 20 mV/K. Der größte Beitrag zur Temperaturabhängigkeit des Rasterkraftmikroskops entsteht durch die Cantileveraufnahme. Da dort mehrere unterschiedliche Materialien mit verschiedenen thermischen Ausdehnungsverhalten und Feuchteabhängigkeiten eingesetzt werden.

Abb. 4: Temperaturabhängigkeit des wegproportionalen Signals des Interferometers des Sondenmesssystems bei einem Temperatursprung von 15 °C bis 25 °C (1 korrigiertes Wegsignal, 2 Totstreckenkorrektur, 3 wegproportionales Signal).

Abb. 5: Signalverhalten im Kontakt mit der Oberfläche (1 wegproportionales Signal, 2 korrigiertes Wegsignal).

3.2 Langzeitstabilität

Die Langzeitstabilität des interferometrischen Rasterkraftmikroskops wurde über 12 Stunden bei einer Temperaturstabilität von ± 10 mK mit und ohne Kontakt zu Messobjektoberfläche bestimmt. Die Spitze-Tal-Werte des Weg- und Winkelsignals betragen entsprechend 3,4 nm und 3,29 nm und die Standardabweichungen 0,8 nm und 0,6 nm (vgl. Abbildung 5). Das Signalrauschen des interferometrischen Rasterkraftmikroskops wie die Langzeitstabilität wurde mit und ohne Kontakt zu der Oberfläche über jeweils einen Zeitraum von 3 s mit den 16-Bit-A/D-Wandler der DSP-Einheit der NMM-1 mehrfach aufgezeichnet. Die ermittelten Standardabweichungen des Signalrauschens belaufen sich auf 0,4 nm beim Interferometer und 0,24 nm beim Lichtzeiger.

3.3 Stabilität der Kalibrierkennlinien

Vor der Durchführung von Messungen sollen die Ausgangssignale des interferometrischen Rasterkraftmikroskops in Längenwerte anhand von Polynomkoeffizienten umgerechnet werden. Diese Koeffizienten werden aus den Auslenkungskennlinien den Ausgangssignalen des Antastsystems berechnet. Für die Kalibrierung wird zuerst eine ebene Fläche eines Messobjektes durch die Bewegung der Spiegelecke der NMM-1 in die Nähe der Antastspitze des Cantilevers gebracht und dann vertikal in Richtung der Spitze über einen bestimmten Messbereich mit konstanter Geschwindigkeit bewegt. Währenddessen werden die Interferometersignale der NMM-1 und Ausgangssignale des Lagedetektors durch die DSP-Einheit der NMM-1 synchron aufgezeichnet. Aus der Vielzahl von nacheinander aufgenommenen Kalibrierkennlinien können deren Linearität, Wiederholbarkeit der Kalibrierkoeffizienten (Offset und Anstieg) sowie der berechneten Sollwerte (siehe Abb. 6) für die Regelung, oder eines beliebigen Messpunktes, und somit die Reproduzierbarkeit der Antastung analysiert werden. Der Kalibriervorgang des interferometrischen Rasterkraftmikroskops in unterschiedlichen Betriebsarten mit entsprechenden Antastspitzen wurde jeweils zweihundertmal wiederholt. Die Standardabweichungen der berechneten Offsetwerte und Sollwerte sowie mittleren Residuen überschreiten nicht 0,5 nm [7] und den Anstiegswerten entsprechend $5 \cdot 10^{-4}$ nm/Digits. Das Kennlinienverhalten und somit der Anstieg bleiben im Verlauf der zweihundert Messungen für jedes Messsignal des Antastsystems konstant. Wiederholt man die Kalibrierung nach einem Austausch oder Nachjustierung des Cantilevers² ändern sich nur die Offsetwerte. Diese Änderungen lassen sich durch die Justage des Cantilevers, Ausrichtung den Quadrantendioden, Nullen des Interferometerzählers, Auswahl der Anregungsamplitude im Intermittent-Modus sowie Definition des Arbeitsbereiches erklären. Allerdings beeinflussen die Offsetänderungen der Messsignale während des Scans das Messergebnis.

3.4 Kombinierte Messunsicherheit

Die Messunsicherheit kann nur einer konkreten Messung zugeordnet werden. Bevor man die Unsicherheit eines Messergebnisses ermitteln kann, soll zuerst ein Modell der Messergebnisberechnung entwickelt werden [6]. Das Messergebnis wird als Differenz zwischen den entsprechenden Ausgangssignalwerten des interferometrischen Rasterkraft-

² Der Cantilevertyp soll unverändert bleiben.

Abb. 6: Berechnete Sollwerte des Biegungssignals und deren Unsicherheiten.

mikroskops und den z-Interferometerwerten der NMM-1 berechnet. In Abhängigkeit von der Betriebsart sind dass das wegproportionale Signal des Interferometers als A/D-Wandlerwert des analoges Signals oder zu dem Demodulationswert proportionaler Längenwert und Biegungssignal oder das zu der Cantileverschwingungen proportionales Amplitudensignal des Lichtzeigers. Alle AFM Messungen können als Differenzmessungen zwischen jeweils zwei Antastpunkten betrachtet werden. Somit kann das Messergebnis h als Differenz zwischen zwei Antastpositionen zu den Zeitpunkten $t1$ und $t2$ angegeben werden. Z. B. gilt für Messungen im Intermittent-Modus ohne Benutzung des piezoelektrischen Hochgeschwindigkeitsantriebs:

$$h = h(t2) - h(t1) = d_z(t2) - d_z(t1) - [l_z(t2) - l_z(t1)] \\ = k_{d_z} [a_2(t2) - a_2(t1)] - [l_z(t2) - l_z(t1)]. \quad (1)$$

Das Messergebnis bei interferometrischer Positionserfassung wird folgend angegeben:

$$h = h(t2) - h(t1) = d_x(t2) - d_x(t1) - [l_z(t2) - l_z(t1)] \\ = k_{d_x} [a_1(t2) - a_1(t1)] - [l_z(t2) - l_z(t1)]. \quad (2)$$

Berücksichtigt man die mögliche Brechzahländerungen während der interferometrischen Positionsmessung, kann das Messergebnis h mit nachfolgender Gleichung berechnet werden:

$$h = k_{d_x} \left[a_1(t2) \frac{\lambda_0}{\lambda_{nr} n(t2)} - a_1(t1) \frac{\lambda_0}{\lambda_{nr} n(t1)} \right. \\ \left. + \frac{2^{15}}{10k_{SM}} \left(l_{kor}(t2) - l_{kor}(t1) \right) \right] - [l_z(t2) - l_z(t1)]. \quad (3)$$

l_{kor} ist die Totstreckenkorrektur und kann entsprechend der Gleichung (4) unter Berücksichtigung der Vorzeichen- definition im Interferometer und der Lage der Totstrecke

im Messarm (vgl. Abb. 1) berechnet werden:

$$l_{kor}(t) = \overbrace{l_t \left(\frac{n(0)}{n(t)} - 1 \right)}^{\text{Korrektur Luftstrecke}} \\ + \overbrace{l_t \alpha_{BK7} \Delta \vartheta \left(\frac{n_{BK7}(t)}{n(t)} - 1 \right) + l_t \left(\frac{n_{BK7}(t) - n_{BK7}(0)}{n(t)} \right)}^{\text{Korrektur Glasstrecke}} \\ \underbrace{\hspace{10em}}_{\text{Ausdehnung des Glases}} \quad \underbrace{\hspace{10em}}_{\text{Brechzahländerung des Glases}} \quad (4)$$

Entsprechend der Modellgleichung (3) kann man folgende Einflussgrößen bzw. Eingangsgrößen nennen:

- Kalibrierkoeffizient k_{d_x} ,
- Luftbrechzahl bei Normalbedingungen n_{nr} ,
- A/D-Wandlerwert a_1 zu den Zeitpunkten $t1$ und $t2$,
- Luftbrechzahl n sowie Lufttemperatur ϑ , -druck p und -feuchte φ beim Nullen des Zählers des Interferometers des Lagedetektors sowie zu den Zeitpunkten $t1$ und $t2$,
- Totstrecke l_t ,
- Messbereichfaktor der Schwingungsmesskarte k_{SM} ,
- Ausdehnungskoeffizient des Glases α_{BK7} ,
- Glasbrechzahl n_{BK7} beim Nullen und zu den Zeitpunkten $t1$ und $t2$ sowie
- Messwert der z-Achse der NMM-1 l_z zu den Zeitpunkten $t1$ und $t2$.

Für die Angabe der kombinierten Messunsicherheit des Messergebnisses nach GUM (Guide to the expression of uncertainty in measurement) [9] ist die Kenntnis der Standardunsicherheiten aller Eingangsgrößen sowie deren Empfindlichkeitskoeffizienten notwendig:

$$u_c = \sum_{i=1}^n u_i^2(h) = \sum_{i=1}^n (|c_i| u(x_i))^2 = \sum_{i=1}^n \left(\left| \frac{\partial h}{\partial x_i} \right| u(x_i) \right)^2 \quad (5)$$

Die Empfindlichkeitskoeffizienten beschreiben die Abhängigkeit des Messergebnisses von den Eingangsgrößen und werden durch die Differentialquotienten (vgl. Gleichung (5)) bestimmt. Zusätzlich sollen auch die möglichen Korrelationen zwischen den Eingangsgrößen beachtet werden. Z. B. besteht eine Korrelation zwischen Luftbrechzahl n und Lufttemperatur ϑ , Glasbrechzahl n_{BK7} und Lufttemperatur ϑ , Luftbrechzahl n und Glasbrechzahl n_{BK7} sowie zwischen den zu unterschiedlichen Zeitpunkten gemessenen Umweltparametern, A/D-Wandlerwerten a_1 und Messwerten l_z . Durch das Einsetzen der Gleichungen für das Luft- und Glasbrechzahlberechnung in die Modellgleichung (3) und die zu unterschiedlichen Zeitpunkten aufgenommene Umwelt- und Messdaten werden Entsprechend des Berechnungsansatzes nach [12] durch Differenzwerte

ersetzt:

$$\begin{aligned}\vartheta(t1) &= \vartheta(0) + \Delta\vartheta_1, & \vartheta(t2) &= \vartheta(0) + \Delta\vartheta_1 + \Delta\vartheta_2 \\ &\vdots \\ l_z(t2) &= l_z(t1) + \Delta l_z\end{aligned}\quad (6)$$

Aufgrund der sehr komplexen Abhängigkeiten des Messergebnisses h von Umweltparametern, wurden die partiellen Ableitungen bzw. Sensitivitätskoeffizienten numerisch berechnet. Zur Abschätzung der Driften und des Kriechens der Signale des Lagedetektors nach [6] werden die Unsicherheitswerte u_r den Residuen (oder Abweichungen) r der Kalibrierkennlinien einbezogen.

Die kombinierte Messunsicherheit des Messergebnisses u_c wurde anhand der aufgenommenen Daten während einer Oberflächenmessung mit (a) und ohne (b) Berücksichtigung der Brechzahländerungen und der Totstreckenkorrektur für vier unterschiedlichen Bedingungen wie Kurzzeit- (bis ca. 0,5 Stunden) und Langzeitmessungen (ca. 24 Stunden) mit und ohne aktiver Temperierung berechnet.

Die Schätzwerte der Umweltdaten $\Delta\vartheta_1, \Delta\vartheta_2, \dots$ und $\Delta\varphi_2$ basieren auf zahlreichen, über mehrere Monate aufgenommenen, Daten. Die Standardmessunsicherheiten der Umweltdaten werden im Falle (a), der Berücksichtigung der Brechzahländerungen und der Totstreckenkorrektur, wie in [6] angegeben. Im anderen Fall (b) werden die Standardmessunsicherheiten nach der Ermittlungsmethode Typ B nach GUM [9] eingesetzt. Es wird angenommen dass die Totstrecke l_t bis auf ± 1 mm bekannt ist. Allerdings wird im Fall der Nichtberücksichtigung der Brechzahländerungen und der Totstreckenkorrektur die Standardmessunsicherheiten der Totstrecke gleich der Totstrecke selbst angenommen: $u(l_t) = l_t = 13$ mm. Die Standardmessunsicherheit der Wegdifferenz $u(\Delta l_z)$ wurde aus [11] entnommen. Da die Messstrecken bei den AFM-Messungen normalerweise nur einigen mm betragen, wurde der größte Beitrag zur Positionierungsunsicherheit der NMM-1 aus der Messung und Darstellung der Oberflächenabweichungen der Spiegelecke vernachlässigt.

Die Unsicherheitsbeiträge der Residuen $r(u_r(h))$, Differenzwerten $\Delta a_1(u_{\Delta a_1}(h))$, $\Delta\vartheta_2(u_{\Delta\vartheta_2}(h))$, $\Delta p_2(u_{\Delta p_2}(h))$, Totstrecke $l_t(u_{l_t}(h))$, Ausdehnungskoeffizienten des Glases $\alpha_{BK7}(u_{\alpha_{BK7}}(h))$ und Wegdifferenz $\Delta l_z(u_{\Delta l_z}(h))$ sind gegenüber den restlichen Unsicherheitsbeiträgen dominant.

Vergleicht man die Unsicherheitsbeiträge der Umweltparameter $\Delta\vartheta_2(u_{\Delta\vartheta_2}(h))$ und $\Delta p_2(u_{\Delta p_2}(h))$ sowie der Totstrecke $l_t(u_{l_t}(h))$ wird deutlich, dass während der Kurzzeitmessungen weder die Berücksichtigung der Brechzahländerungen und der Totstreckenkorrektur noch das

Anschalten der Temperierung notwendig sind. Während Langzeitmessungen sind große (von ca. 1 kPa) nicht beeinflussbare Luftdruckschwankungen besonders kritisch. Somit ist es empfehlenswert den Luftdruck sowie weitere Umweltparameter aufzuzeichnen um gegebenenfalls die Brechzahländerungen und deren Einfluss auf die Totstrecke nachträglich zu korrigieren. Außerdem sollte man während der Messungsplanung die Messzeit berücksichtigen und möglichst reduzieren. Die resultierende Kombinierte Standardunsicherheit des Messergebnisses während der Kurzzeitmessungen mit und ohne Temperierung und mit und ohne Berücksichtigung der Brechzahländerungen und der Totstreckenkorrektur beläuft sich auf 6 nm. Während der Langzeitmessungen steigt dieser Wert von 7 nm im Falle (a) auf 20 nm im Falle (b) mit angeschalteter Temperierung und sogar auf 40 nm ohne Temperierung.

4 Applikationsmessungen

Das interferometrische Rasterkraftmikroskop wird für unterschiedliche Langstrecken- und skalenübergreifende Messungen [14, 15] neben den Stufenhöhen- und Gitterabstandsbestimmungen [4] eingesetzt.

Im Folgenden wird gezeigt, dass das interferometrische Rasterkraftmikroskop auch für hochpräzise Bestimmung von Gitterabständen speziellen Teststrukturen mit nominellen Gitterperioden von wenigen Nanometer geeignet ist. Es wurde ein $0,3 \mu\text{m} \times 1,2 \mu\text{m}$ großes Messfeld auf einer 45 nm-Struktur mit einem Messpunkt Abstand von 1 nm abgescannt. Die Messungen wurden mit einem speziellen SS ISC Cantilever mit einer Spitze mit einem nominellen Radius von ≤ 5 nm durchgeführt. Für jedes gemessene Profil wurde die Strukturperiode mittels Fourier-Transformation und Schwerpunktmethod ermittelt. Die mittlere Periode über das ganze Messfeld (alle gemessene Profile) beträgt 44,964 nm ($U = 0,014$ nm, $k = 2$).

5 Zusammenfassung

Nach einer kurzen Erläuterung der Aufbau des Lagedetektors und Funktionsprinzips des interferometrischen Rasterkraftmikroskops wurden seine messtechnischen Eigenschaften wie Umweltabhängigkeit, Langzeitstabilität und Stabilität der Kalibrierkennlinien diskutiert. Für die Berechnung einer kombinierter Messunsicherheit einer Messung wurde eine Modellgleichung zusammengestellt, Einflussgrößen, deren Standardunsicherheiten und Empfindlichkeitskoeffizienten bestimmt. Es zeigte sich, dass in

Abb. 7: Gemessene im Intermittent-Modus Teststruktur, eine der Scanlinien.

Abhängigkeit von der Messdauer und -Bedingungen sowie Berücksichtigung der Brechzahländerungen und der Totstreckenkorrektur die Messunsicherheit zwischen 6 nm und 40 nm variieren kann. Eine der Maßnahmen für die Verringerung der kombinierten Messunsicherheit wäre eine Anpassung optischer Wege im Mess- und Referenzarm des Interferometers des Lagedetektors sowie nicht nachträgliche sondern direkte Brechzahlkorrektur während der Messung. Zum Schluss wurde eine Messung an einer Gitterstruktur mit einer nominellen Gitterperiode von 45 nm vorgestellt.

Danksagung: Die Autoren danken allen Kollegen, die zu den vorgestellten Ergebnissen beigetragen haben. Besonderer Dank geht an die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung.

Literatur

- [1] H.-J. Büchner und G. Jäger. A novel plane mirror interferometer without using corner cube reflectors. *Measurement Science and Technology*, 17(4):746, 2006. URL <http://stacks.iop.org/0957-0233/17/i=4/a=021>.
- [2] A. Donges und R. Noll. *Lasermesstechnik: Grundlagen und Anwendungen*. Technische Physik. Hüthig, 1993. ISBN 9783778522165. URL <https://books.google.de/books?id=NBSrAAAACAAJ>.
- [3] N. Dorozhovets, T. Hausotte, E. Manske, G. Jäger und N. Hofmann. Metrological scanning probe microscope, 2006. URL <https://doi.org/10.1117/12.664407>.
- [4] N. Dorozhovets, T. Hausotte, G. Jäger und E. Manske. Application of the metrological scanning probe microscope for high-precision, long-range, traceable measurements, 2007. URL <https://doi.org/10.1117/12.726230>.
- [5] T. Hausotte. *Nanopositionier- und Nanomessmaschine*. ISLE, 2002. ISBN 9783932633713. URL <https://books.google.de/books?id=AW28AgAACAAJ>.
- [6] T. Hausotte. *Nanopositionier- und Nanomessmaschinen: Geräte für hochpräzise makro- bis nanoskalige Oberflächen- und Koordinatenmessungen*. Pro Business, 2011. ISBN 9783868059489. URL <https://books.google.de/books?id=NgFRtwAACAAJ>.
- [7] T. Hausotte, N. Vorbringer-Dorozhovets, J. C. Shen, E. Manske und G. Jäger. Dimensional metrology in the macroscopic range with sub-nanometre resolution. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 227(5), 2014. 10.1177/0954405413476386.
- [8] H. Kogelnik und T. Li. Laser beams and resonators. *Appl. Opt.*, 5(10):1550–1567, Oct 1966. 10.1364/AO.5.001550. URL <http://ao.osa.org/abstract.cfm?URI=ao-5-10-1550>.
- [9] Norm DIN V ENV 13005:1999-06. Leitfaden zur Angabe der unsicherheit beim messen. DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Juni 1999.
- [10] B. Saleh und M. Teich. *Grundlagen der Photonik*. Lehrbuch Physik. Wiley-VCH, 2008. ISBN 9783527406777. URL <https://books.google.de/books?id=dXSfqi1izUkC>.
- [11] I. Schmidt Dr.-Ing. *Beiträge zur Verringerung der Positionierungsunsicherheit in der Nanopositionier- und Nanomessmaschine*. PhD thesis, Nov 2008. URL https://www.db-thueringen.de/receive/dbt_mods_00011691.
- [12] K.-D. Sommer und B. R. Siebert. Praxisgerechtes bestimmen der messunsicherheit nach gum (practical determination of the measurement uncertainty under gum). *Technisches Messen*, 71:52–66, 2004.
- [13] N. Vorbringer-Dorozhovets, T. Hausotte, E. Manske, J. C. Shen und G. Jäger. Novel control scheme for a high-speed metrological scanning probe microscope. *Measurement Science and Technology*, 22(9):094012, 2011. URL <http://stacks.iop.org/0957-0233/22/i=9/a=094012>.
- [14] N. Vorbringer-Dorozhovets, R. Füßl und E. Manske. Application of the metrological spm for long distance measurements. *Shaping the future by engineering: 58th IWK, Ilmenau Scientific Colloquium, Technische Universität Ilmenau*, 8-12 September 2014.
- [15] N. Vorbringer-Dorozhovets, B. Goj, T. Machleidt, K.-H. Franke, M. Hoffmann und E. Manske. Multifunctional nanoanalytics and long-range scanning probe microscope using a nanopositioning and nanomeasuring machine. *Measurement Science and Technology*, 25(4):044006, 2014. URL <http://stacks.iop.org/0957-0233/25/i=4/a=044006>.
- [16] N. Vorbringer-Dorozhovets, E. Manske und G. Jäger. Interferometer-based scanning probe microscope for high-speed, long-range, traceable measurements. *Pomiary Automatyka Kontrola*, R. 60, nr 2:69–72, 2014.