Andreas C. Gröschl*, Janik Schade und Tino Hausotte

Evaluation und Korrektur thermischer Driften eines hochfrequent fokusabstandsmodulierten, fasergekoppelten konfokalen Punktsensors

Evaluation and correction of thermal drifts using a high-speed focal-distance-modulated fibre-coupled confocal sensor

DOI 10.1515/teme-2019-0060

Zusammenfassung: In diesem Artikel wird die Messpräzision eines hochfrequent fokusabstandsmodulierten, fasergekoppelten Konfokalsensors unter temperaturstabilen Bedingungen bestimmt. Insbesondere in der Mikro- und Nanomesstechnik verursachen thermische Driften signifikante Messabweichungen. Diese lassen sich bei wiederholten Messungen zwar zu einem großen Teil korrigieren, innerhalb einer Messung ist dies bisher jedoch nicht möglich. Das verwendete Nanokoordinatenmesssystem (NMM-1) wurde daher um eine Temperierhaube erweitert, um thermische Driften zu minimieren. Weiterhin wird die Temperatur mittels kalibrierter Pt100-Temperatursensoren während der Messungen erfasst, um die Korrelation des Messergebnisses und der Temperatur quantitativ zu bestimmen. Inwiefern die Korrektur des Messergebnisses anhand der aufgenommenen Temperatur möglich ist, wird in diesem Artikel evaluiert.

Schlüsselwörter: Konfokalsensor, Nanokoordinatenmessgerät, Temperaturkompensation.

Abstract: The article presents the determination of the measurement precision of a high-speed focal-distance-modulated fiber-coupled confocal sensor under thermally stable conditions. Thermal drifts cause significant deviations, particularly in the micro- and nano-measuring range. Although these deviations can be corrected mainly in repeated measurements, this is not possible within one single measurement. The used nano-coordinate measuring system (NMM-1) was therefore extended by a thermostating housing to minimize thermal drifts. Furthermore,

the temperature is recorded by means of calibrated Pt100 temperature sensors during the measurements in order to determine the correlation of the measurement result and the temperature. This article emphasizes the possibility of a correction of the measurement results based on the recorded temperatures.

Keywords: Confocal sensor, nano-coordinate measuring system, temperature correction.

1 Einleitung

Die Miniaturisierung und Mikrostrukturierung komplexer Bauteile und die damit einhergehenden immer enger werdenden Fertigungstoleranzen stellen die Messtechnik vor gänzlich neue Herausforderungen. Mit speziellen Mikro- und Nanopositioniersystemen ist es seit einigen Jahren bereits möglich, hochgenaue, dreidimensionale Relativbewegungen zwischen Sensor und Messobjekt in Bereichen von einigen Millimetern und mit Auflösungen im Nano- oder Sub-Nanometerbereich zu realisieren [13]. Der Bedarf an hochgenauen Sensoren zur Antastung der Messobjekte, die solchen herausfordernden Messaufgaben gewachsen sind, ist jedoch nicht gedeckt.

Ein 1957 von Minsky patentiertes und seither bewährtes optisches Verfahren stellt die Konfokalmikroskopie dar [11]. Durch die Kombination einer konfokal angeordneten Beleuchtungs- und Detektionsblende gelangt das von einer Oberfläche reflektierte Licht nur durch die Detektionsblende, wenn sich diese im gemeinsamen Fokus befindet. Dadurch wird eine sehr hohe Tiefendiskriminierung und folglich eine hohe axiale Auflösung ermöglicht. Die Verwendung dieser Konfokaltechnik und deren Einsatz als Punktsensor in konfokalen Laserscanningmikroskopen (engl. confocal laser scanning microscopy, Abk. CLSM) hat damit auch in der Oberflächenmesstechnik einen hohen Stellenwert erlangt [1]. Aufgrund der symmetrisch abfallenden Intensitätsfunktion bei Defokussierung

*Korrespondenzautor: Andreas C. Gröschl, Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Nägelsbachstr. 25, 91052 Erlangen, E-Mail: andreas.groeschl@fmt.fau.de

Janik Schade, Tino Hausotte, Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Nägelsbachstr. 25, 91052 Erlangen

sowie der Abhängigkeit der detektierten Intensität von den Reflektionseigenschaften der Oberfläche muss zur Höherfassung jeder laterale Messpunkt mindestens um den Bereich des Maximums dieser Intensitätsfunktion axial abgetastet werden. Anstatt aufeinanderfolgend jeden lateralen Messpunkt axial abzutasten, werden häufig auch lateral flächige Abtastungen auf diskreten axialen Höhen durchgeführt, um anschließend für jeden lateralen Punkt die Schicht mit der maximalen Intensität bzw. die axiale Lage des Maximums zu ermitteln. Damit ist jedoch eine flächenhafte Erfassung insbesondere von Oberflächen mit hohen axialen Strukturen sehr zeitaufwendig.

Neben dem Ansatz der axialen Abtastung durch mechanische Verschiebung des Messobjekts oder Objektives ist auch die Verwendung adaptiver Optiken zur Modulation der Fokusebene bekannt [9]. Weiterhin werden akustisch getriebene, hochfrequent modulierbare Gradientenoptiken in Mikroskopieanwendungen [10] und konfokalen Systemen genutzt [3].

Die Kombination eines fasergekoppelten, konfokalen Punktsensors mit einer solchen Gradientenoptik zur hochfrequenten Modulation der Fokusposition unter Beibehaltung aller bekannten Vorteile der Konfokaltechnik und die Signalverarbeitung, mit welcher eine annähernd lineare Kennlinie erzeugt wird, wurde in [8] vorgestellt und wird in Kapitel 2 nochmals kurz skizziert. Außerdem ließ sich durch Quotientenbildung bei der Signalverarbeitung eine von der Reflektivität der Werkstückoberfläche und von der Verkippung derselben weitestgehend unabhängige Kennlinie erreichen [4, 6]. Diese Kennlinie lässt sich bei Messungen zur Regelung der axialen Position des Positioniertisches des Nanokoordinatenmesssystems NMM-1 [7] nutzen, um während einer lateralen Abtastung den Arbeitsabstand zwischen Mikroskopobjektiv und Messobjekt konstant zu halten und so stetige Oberflächen durch eine einzige laterale Abtastung zu erfassen, wodurch die Messdauer im Vergleich zur konventionellen Konfokalmikroskopie signifikant verringert wird und folglich auch der Einfluss thermischer Driften auf das Messergebnis [5]. Dennoch blieb der Messunsicherheitsbeitrag der Temperaturschwankung dominierend, weshalb die verwendete NMM-1 um eine Haube zur Temperierung erweitert wurde, um thermisch bedingte Messabweichungen zu minimieren und die Wiederholpräzision [2] des Sensors bei gleichbleibender Temperatur zu bestimmen.

2 Aufbau und Umgebungsbedingungen

Der optische Aufbau des Sensors wurde detailliert in [8] vorgestellt und ist in Abbildung 1 skizziert.

Abb. 1: Optischer Aufbau des fokusabstandsmodulierten Punktsensors mit: 1. Laser; 2. Fotodiode, 3. Lichtwellenleiter mit Strahlteilung, 4. Kollimationslinse, 5. TAG-Linse, 6. Strahlteiler, 7. Mikroskopobjektiv, 8. Messobjekt, 9. Strahlteiler, 10. Tubuslinse, 11. Kamerasensor, 12. Weißlichtquelle, 13. Kollimationslinse, 14. bildgebendes System, 15. Sensorkopf, durchgezogene und gestrichelte (rote) Linien: modulierter Strahlengang der konfokalen monochromatischen Beleuchtung und Detektion, Strichpunktlinie (blaue und grüne) Linien: Strahlengang der Kameraerfassung und Beleuchtung in Anlehnung an [8].

Zusammengefasst wird hier Licht einer monochromatischen Laserquelle (1) in einen Monomodelichtwellenleiter mit integrierter Strahlteilung (3) eingekoppelt, am Faserende wieder ausgekoppelt und über eine Kollimationslinse (4) kollimiert. Beim Passieren der modulierbaren Flüssigkeitsgradientenlinse (engl. tuneable, acoustically driven gradient index fluid lens, Abk. TAG-Linse [12]) (5) wird der zuvor kollimierte Strahl abwechselnd hochfrequent aufgeweitet bzw. fokussiert. Durch ein nachfolgendes, auf unendlich korrigiertes Nikon 100x Mikroskopobjektiv (7) mit $NA = 0,8$ erfolgt hierdurch eine sinusförmige Modulation des Laserlichtfokus in axialer Richtung um die Brennebene des Objektives mit der Amplitude A_f . Befindet sich das Messobjekt innerhalb dieser Fokusmodulation kann durch eine Fotodiode (2) ein Signal detektiert werden,

woraus mit der Information der Phase der Modulation durch ein Triggersignal und einer Lock-In-Verstärkung eine annähernd lineare Kennlinie erzeugt wird [8]. Zunächst wurden Messungen in einem Messraum mit einer Temperatur ϑ sowie zeitlichen und räumlichen Temperaturkonstanz von $20^\circ\text{C} \pm 0,2\text{K}$ durchgeführt, wobei gezeigt wurde, dass eine starke Korrelation zwischen erfasster Temperatur und Messabweichung des Sensors vorhanden ist [8]. Wie anhand der im Folgenden gezeigten Messungen zu sehen ist, können die Temperaturkonstanz signifikant verbessert und respektive thermische Abweichungen durch die Verwendung einer zusätzlichen Haube zur Temperierung beträchtlich reduziert werden (s. Abb. 2). In dieser befinden sich 18 speziell entworfene Kühlplatten, die über einen Wasserkreislauf mithilfe eines Julabo Kältethermostats temperiert werden. Weiterhin befindet sich die Haube auf einem eigenen Gestell, das vollständig von der schwingungsgedämpften Granitplatte, auf der sich die NMM-1 befindet, getrennt ist. Eine zusätzliche Schall- und Wärmeisolierung an den Außenseiten der Haube vermindert weiterhin die Übertragung von Schallschwingungen an die NMM-1 und gewährleistet die hohe Temperaturkonstanz, auch bei Temperaturschwankungen innerhalb des Messraums.

Abb. 2: Nanokoordinatenmesssystem (NMM-1) mit Haube zur Temperierung und fokusabstandsmoduliertem Konfokalsensors.

3 Temperaturabhängigkeit des Messergebnisses

Zur quantitativen Bestimmung der Temperaturabhängigkeit des Messergebnisses, wurden mit einem DAkS-kalibrierten Pt100-Tempersensor im Messvolumen der

NMM-1 über einen Zeitraum von 24 Stunden insgesamt 2100 axiale Abtastungen eines lateralen Oberflächenpunktes durchgeführt, wobei jeweils die Ausgangssignale der Lock-In-Signalverarbeitung (vgl. [8]) $V_{\text{out},2}$ und $V_{\text{out},3}$ sowie das rückgeführte Interferometersignal des Positionierisches z_{NMM} erfasst wurden. Für jede dieser Abtastungen lässt sich eine Kennlinie $z(V_{\text{out},3}/V_{\text{out},2})$ als Polynom dritten Grades ermitteln. Dieses Vorgehen wird im Folgenden als Kalibrierung des Sensors bezeichnet. Bei jeder Kalibrierung wird jeweils der Nullpunkt der Kennlinie z_0 bestimmt. Die mittlere Temperatur lag im gesamten Zeitraum bei $19,99^\circ\text{C}$, die Temperaturschwankung bei 17mK mit einer Standardabweichung von 4mK . Die Abweichung der Temperaturen $\Delta\vartheta$ vom Mittelwert sowie z_0 sind in Abbildung 3 dargestellt. Die zeitlichen Abweichungen zwischen den gemessenen Temperaturen und den Positionen der Nulldurchgänge z_0 sind nicht konstant, wobei noch evaluiert werden muss, ob dies daran liegt, dass der Sensor zu träge ist oder ob die Temperatur an der falschen Stelle gemessen wird. Bei den gezeigten Messdaten eilen die gemessenen Temperaturen den Positionen der Nulldurchgänge z_0 nach. Für eine Verzögerung von 54 Minuten wird der lineare Korrelationskoeffizient hier mit $0,90$ maximal. In Abbildung 4 sind die Nulldurchgänge über die um 54 Minuten verschobenen Temperaturen dargestellt. Mittels linearer Regression, dargestellt in Rot, ergibt sich eine Abhängigkeit von z_0 von der Temperatur von $-1,237 \frac{\text{nm}}{\text{mK}}$.

Abb. 3: Veränderung des Nulldurchgangs über 24 Stunden.

Abb. 4: Nulldurchgang über die um 54 Minuten verschobene Temperaturabweichung über 24 Stunden. Linear Regressionslinie in Rot.

Abb. 5: Abweichungen der durch die erste Kennlinie bestimmten z-Werte zu den durch die NMM-1 bestimmten z-Werten für alle 25 Kalibrierungen. Residuen der Kennlinie in Rot.

4 Bestimmung der Messpräzision des Sensors

4.1 Wiederholpräzision

Um die kurzfristige Messpräzision des Sensors zu bestimmen, wurden 25 Kalibrierungen gewählt, bei denen die Temperaturschwankung minimal war. Für die ausgewählten Kalibrierungen lag die Temperaturschwankung unterhalb der Auflösung der Temperatursensoren von 1 mK, in einem Zeitraum von 16 Minuten. Bei jeder Kalibrierung werden zunächst die Residuen, d. h. die Differenzen Δz der z-Werte des Positioniertisches z_{NMM} zu den aus der Kennlinie errechneten z-Werten $z(V_{\text{out},3}/V_{\text{out},2}) - z_{\text{NMM}}$ bestimmt (s. beispielhaft rote Werte aus erster Kalibrierung in Abb. 5). Betrachtet man die Residuen aller Kennlinien, so liegt die Standardabweichung im Mittel bei 1,3 nm. Anschließend werden die Differenzen Δz aller 25 Kennlinien zu allen z-Werten z_{NMM} aller jeweils anderen Kalibrierungen bestimmt (s. grüne Werte in Abb. 5, beispielhaft für die Kennlinie aus der ersten Kalibrierung).

In Abbildung 6 sind diese Differenzen in einem Histogramm dargestellt. Unter Vernachlässigung der Messunsicherheit des Laserinterferometers beträgt die aufgabenspezifische, für den gesamten Kennlinienbereich ermittelte Standardmessunsicherheit 1,7 nm.

4.2 Vergleichspräzision

In gleicher Weise wie in Kapitel 4.1 wird die Vergleichspräzision über die Standardabweichung von 105 über einen

Abb. 6: Histogramm der Abweichungen. Standardmessunsicherheit $\sqrt{\text{Var}(\Delta z)} = 1,7$ nm in Rot.

Zeitraum von 12 Stunden aufgenommenen Kennlinien ermittelt. Die so ermittelte Standardabweichung beträgt 3,6 nm, die Temperaturschwankung in diesem Zeitraum lag bei 6,5 mK.

Um die Möglichkeit der Temperaturkorrektur zu evaluieren, wurden weiterhin analog zur Vorgehensweise in Kapitel 3 über einen weiteren Zeitraum von 24 Stunden erneut 2100 Kalibrierungen durchgeführt und die Nulldurchgänge der Kennlinien bestimmt. Diese weisen eine Standardabweichung von 14,1 nm bei einer maximalen Schwankung von 45,9 nm auf. Die Korrektur der temperaturbedingten Driften erfolgt mittels der in Kapitel 3 ermittelten Verzögerung und des entsprechenden Korrekturfaktors. Die originalen und korrigierten Nulldurchgänge sind in Abbildung 7 dargestellt. Die Standardabweichung der so

korrigierten Nulldurchgänge liegt bei 9,1 nm bei einer maximalen Schwankung von 33,9 nm. In diesem Zeitraum lag die maximale Temperaturschwankung ebenfalls bei 17 mK mit der gleichen Standardabweichung von 4 mK.

Abb. 7: Korrektur der thermischen Drift des Nulldurchgangs.

5 Fazit

Es konnte gezeigt werden, dass durch die Verwendung einer Haube zur Temperierung thermisch bedingte Messabweichungen, respektive die Messunsicherheit des vorliegenden Sensors signifikant reduziert werden konnten. Eine zusätzliche rechnerische Korrektur dieser Messabweichungen konnte ebenfalls nachgewiesen werden, wobei zu vermuten ist, dass diese weiterhin verbessert werden kann. Dazu ist geplant, die Temperatur einzelner optischer Komponenten des Sensors separat zu erfassen und die Korrelationen zu bestimmen.

Danksagung: Die Autoren möchten der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Finanzierung der Sensorentwicklung und -untersuchung im Rahmen des Projekts (HA 5915/10-1) danken. Die Haube zur Temperierung entstand im Rahmen des EMPIR Programms, kofinanziert von den Mitgliedsstaaten und des Horizont 2020 Forschungs- und Innovationsprogramms der Europäischen Union. Die Autoren möchten weiterhin Frau Ute Klöpzig und Herrn Julien Schinn für die Entwicklung, Konstruktion und Aufbau der Temperierhaube danken.

Literatur

- [1] C. Cremer und T. Cremer. Considerations on a laser-scanning-microscope with high resolution and depth of field. *Microsc. Acta*, 81(1):31–44, 1978.
- [2] DIN Deutsches Institut für Normung e. V. *Internationales Wörterbuch der Metrologie (VIM) Deutsch-Englische Fassung ISO/IEC-Leitfaden 99:2007*. Beuth Verlag GmbH, 2012.
- [3] M. Duocastella, G. Vicidomini und A. Diaspro. Simultaneous multiplane confocal microscopy using acoustic tunable lenses. *Optics Express*, 22(16):019293 (9pp), 2014.
- [4] A. Gröschl, S. Koehnen, J. Schauder und T. Hausotte. Improvements of a high-speed focus distance modulated fibre-coupled confocal sensor for nanocoordinate measuring systems. *Sensoren und Messsysteme*, S. 89–101, 2018. ISSN SBN 978-3-8007-4683-5.
- [5] A. Gröschl, J. Schauder und T. Hausotte. Kontinuierliche laterale Abtastung von Oberflächen durch axiale Regelung des Arbeitsabstandes in einem Nanokoordinatenmessgerät mit einem hochfrequent fokusabstandsmodulierten, fasergekoppelten, konfokalen Punktsensor; Lateral closed-loop scans of surfaces using a nano coordinate measuring system and a high-speed focal-distance modulated fibre-coupled confocal sensor. *Technisches Messen*, 85:26–32, 2018.
- [6] A. C. Gröschl, J. Schauder und T. Hausotte. Evaluation und Justierung eines neuartigen, hochfrequent fokusabstandsmodulierten, fasergekoppelten, konfokalen Punktsensors für axial geregelte Oberflächenmessungen mit einem Nanokoordinatenmessgerät - Evaluation and adjustment of a novel high-speed focal-distance modulated fibre-coupled confocal sensor for axial closed-loop surface scans with a nano coordinate measuring system. *Technisches Messen*, 86(4):216–226, 2019.
- [7] T. Hausotte, B. Percle und G. Jäger. Advanced three-dimensional scan methods in the nanopositioning and nano-measuring machine. *Meas. Sci. Technol.*, 20(8):1–8, 2009.
- [8] T. Hausotte, A. Gröschl und J. Schauder. High-speed focal-distance-modulated fiber-coupled confocal sensor for coordinate measuring systems. *Applied Optics*, 57(14):3907–3914, 2018.
- [9] N. Koukourakis, M. Finkeldey, M. Stürmer, C. Leithold, N. C. Gerhardt, M. R. Hofmann, U. Wallrabe, J. W. Czarske und A. Fischer. Axial scanning in confocal microscopy employing adaptive lenses (cal). *Optics Express*, 22(5):006025 (15pp), 2014.
- [10] A. Mermillod-Blondin, E. Mcleod und C. B. Arnold. High-speed varifocal imaging with a tunable acoustic gradient index of refraction lens. *Optics Letters*, 33(18):2146 – 2148, 2008.
- [11] M. Minsky. Microscopy apparatus, Nov. 1961.
- [12] *The Physics behind TAG Optics' Technology and the Mechanism of Action of using Sound to shape Light*. Tag Optics Inc., 2013.
- [13] E. Uhlmann, B. Mullany, D. Biermann, K. P. Rajurkar, T. Hausotte und E. Brinksmeier. Process chains for high-precision components with micro-scale features. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 65:549–572, 2016.