Jörg Riebeling*, Igor Wellem, Gerd Ehret und Peter Lehmann

Erfassung von Formabweichungen rotierender optischer Flächen mit linien-scannendem Interferometer, Echtzeitauswertung und Achsabweichungskompensation

Detection of form deviations of rotating optical surfaces with line-scanning interferometer, real-time evaluation and compensation of scan axis deviations

DOI 10.1515/teme-2019-0049

Zusammenfassung: Im Rahmen dieses Beitrages wird die Weiterentwicklung eines Michelson-Interferometer-Aufbaus [3, 4] zur Messung von Formabweichungen rotierender Messobjekte vorgestellt. Das Interferometer nutzt eine sinusförmige Weglängenmodulation im Referenzarm, um Oberflächen rotierender Messobjekte mithilfe einer Zeilenkamera zu erfassen. Der Sensor wurde um zwei zusätzliche interferometrisch messende Punktsensoren erweitert, welche gegenüber einer bekannten Referenzfläche sowohl stochastische als auch systematische Abweichungen der Rotationsbewegung mit einer minimalen Messunsicherheit von unter 1 nm erfassen können [7, 8] und so den Einsatz einer kostengünstigen Rotationsachse ermöglichen. Aus den Messdaten der Punktsensoren werden in Echtzeit relative Abstandswerte errechnet. Diese werden gespeichert und nach der Messung zur Korrektur der ebenfalls in Echtzeit ermittelten Höhenwerte des Liniensensors verwendet. Ergebnisse einer Messung unter Verwendung einer Rotationsachse mit starken stochastischen Höhenabweichung werden sowohl mit als auch ohne Korrektur anhand der Punktsensorergebnisse gezeigt. Ein optimiertes mechanisches Design wird vorgestellt, welches durch eine reduzierte Anzahl mechanischer Komponenten die Empfindlichkeit des Sensors gegen äußere Störeinflüsse reduziert.

Schlüsselwörter: Interferometrie, Formmessung, Echtzeit-Auswertung, Phasenschiebende Interferometrie.

***Korrespondenzautor: Jörg Riebeling**, Fachgebiet Messtechnik, Fachbereich Elektrotechnik/Informatik, Universität Kassel, Wilhelmshöher Allee 71, 34121 Kassel, E-Mail: joerg.riebeling@uni-kassel.de

Igor Wellem, Peter Lehmann, Fachgebiet Messtechnik, Fachbereich Elektrotechnik/Informatik, Universität Kassel, Wilhelmshöher Allee 71, 34121 Kassel

Gerd Ehret, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Bundesallee 100, 38166 Braunschweig, E-Mail: Gerd.Ehret@ptb.de

Abstract: In this contribution we present a revision of a low-cost Michelson interferometric setup [3, 4] to measure form deviations of rotating optical surfaces. The setup uses a line-scan camera and a sinusoidal path length modulation of the reference path to capture the surface of rotating measurement samples. The setup is extended by two interferometric point sensors that provide a repeatability of less than 1 nm [7, 8]. These sensors measure systematic and stochastic deviations of the specimen's positioning induced by the rotational axis of the object stage with respect to a well-known reference surface, enabling the use of a cost-efficient rotation axis. The data recorded by these sensors is evaluated and stored in real-time to correct the positioning errors in the measured topography data of the line-sensors obtained during the rotational scanning procedure. Results with and without the compensation of the run-out of a measurement using a cost-efficient rotational axis are presented. An optimized mechanical design is introduced that decreases the sensitivity of the sensor to vibrations by reducing the amount of individual mechanical components.

Keywords: Interferometry, form measurement, real-time evaluation, phase shifting interferometry.

1 Einleitung

Interferometrische Messsysteme ermöglichen zerstörungsfreie Oberflächenmessungen empfindlicher Messobjekte mit einer Messunsicherheit im Bereich weniger Nanometer [2, 5]. Das Messen größerer Messobjekte mit hoher lateraler Auflösung erfordert präzise und kostenintensive Bewegungssysteme, wie beispielsweise luftgelagerte Achsen, um diese geringe Messunsicherheit auch während der Repositionierung des Sensors zur Messobjektoberfläche zu erhalten. Dies resultiert in hohen Systemkosten, welche

die industrielle Verwendung begrenzen. In diesem Beitrag wird ein überarbeitetes, kostengünstiges Michelson Interferometer vorgestellt, welches eine Zeilenkamera sowie einen sinusförmig oszillierenden Referenzspiegel zur optischen Weglängenmodulation einsetzt [1, 6]. Der Aufbau ermöglicht Messungen von rotationssymmetrischen optischen Funktionsflächen mit einem Durchmesser von mehr als 50 mm. Dafür werden mehrere an unterschiedlichen radialen Positionen einzeln gemessene Kreisringe anhand von redundant erfassten Messdaten zusammengesetzt. Die Messunsicherheit des Sensors von wenigen Nanometern [3] wird durch das Bewegungssystem negativ beeinflusst.

Abb. 1: Referenzoberfläche (rot) und gemessene Oberfläche mit überlagerten Rundlaufabweichungen einer kostengünstigen Rotationsachse (blau).

Abb. 1 veranschaulicht, dass insbesondere Rundlaufabweichungen der Rotationsachse einen großen Einfluss auf die erreichbare Messunsicherheit des Gesamtsystems haben. Präzise Messungen mit einer vergleichsweise ungenauen Rotationsachse erfordern, dass die stochastischen und systematischen Abweichungen der Rotationsbewegung erfasst und kompensiert werden können. Dazu wurde das Messsystem um zwei zusätzliche interferometrisch messende Punktsensoren erweitert, welche eine Messunsicherheit von unter 1 nm erreichen [7, 8]. Diese messen die Höhen- und Rundlaufabweichung einer hochpräzisen, das Messobjekt umgebenden, kreisringförmigen Referenzfläche simultan zur Geometrieerfassung mit dem Liniensensor. Aus den von den Punktsensoren erfassten Messdaten werden in Echtzeit Höhenwerte ermittelt, gespeichert und nach der Messung zur Kompensation der Achsabweichungen aus den Höhenwerten des Liniensensors verwendet. Die Bestimmung der unkorrigierten Höhenwerte des Liniensensors erfolgt ebenfalls in Echtzeit, entweder mithilfe des Hauptprozessors (CPU) oder des Grafikprozessors (GPU) des Messrechners. Für die Auswertung der Punktsensordaten wird ein ARM Mikrocontroller eingesetzt. Zur Demonstration der Realisierbarkeit der Kompensation wird eine Rotationsachse mit einer mechanischen Beschädigung des

Achslagers verwendet (Abb. 2, d). Diese führt zu einer hochfrequenten breitbandigen Variation der gemessenen Höhe mit einer Amplitude von bis zu 500 nm. Im Folgenden wird der Aufbau des Messsystems, das Verfahren zur Echtzeit-Auswertung der Messdaten sowie das Verfahren zur Kompensation der Positionierungsabweichungen erläutert. Messergebnisse mit und ohne Kompensation werden gezeigt.

2 Aufbau des Messsystems und Messablauf

Der für diesen Beitrag verwendete experimentelle Aufbau besteht aus zwei interferometrischen Sensoren. Ein kurzkohärentes linienförmig scannendes Interferometer misst Kreisringsegmente rotationssymmetrischer Messobjekte und ein laser-interferometrischer Punktsensor (Abb. 3) erfasst mechanische Einflüsse der Rotationsachse entlang der z-Achse des Systems. Der Liniensensor (Abb. 2) basiert auf einem Michelson-Interferometer-Aufbau, welcher ein Mikroskopobjektiv mit 5-facher Vergrößerung und einer lateralen Auflösungsgrenze von $2,3 \mu\text{m}$ (Rayleigh) nutzt.

Abb. 2: Links: Messsystem mit Zeilenkamera (a), Kameratubus (b), interferometrischem Punktsensor (c) und Rotationsachse (d); Rechts: optischer Aufbau des Liniensensors mit zwei Strahlteilern (1), Mikroskopobjektiv mit Tubuslinse (2), austauschbarem Referenzarm (3), Weißlichtquelle (4), Kalibrierobjekt (5) und Messobjektaufnahme mit planer und zylindrischer Referenzfläche (6).

Ein im fokussierten Strahlengang des Objektives platzierter Strahlteilerwürfel trennt Referenz- und Messarm und koppelt das Licht der verwendeten Lichtquelle in den

Aufbau ein. Zur Verminderung der Erwärmung des Aufbaus durch die Abwärme der Lichtquelle wird das Licht einer extern platzierten Luminus SBR-70-G 50 W LED über eine optische Faser zum Sensor geführt. Ein optionaler Bandpassfilter kann zur Vergrößerung der Kohärenzlänge und somit des Messbereichs entlang der optischen Achse in den Sensor integriert werden. Ein zweiter Strahlteiler ermöglicht das Einkoppeln des Lichts einer zweiten, in den Sensor integrierten, breitbandigen Lichtquelle, durch die der Sensor auch als Weißlicht-Interferometer betrieben werden kann. Der Weißlicht-Betrieb wird zum senkrechten Ausrichten des Sensors zur Messobjektoberfläche innerhalb seines Arbeitsabstandes verwendet. Der Wärmeeintrag durch die Weißlichtquelle bleibt unberücksichtigt, da der Ausrichtvorgang nur wenige Sekunden beansprucht und die Weißlichtquelle anschließend ausgeschaltet wird. Der Referenzarm wurde so entworfen, dass er ohne Zerlegung des Sensors ausgetauscht werden kann. Dies ermöglicht eine zeitsparende Adaption des Reflexionsgrades des Referenzspiegels an die optischen Eigenschaften des Messobjektes. Für die nachfolgend dargestellten Messergebnisse wurde ein Silizium-Referenzspiegel verwendet, welcher mit einer Frequenz von 1 kHz sinusförmig aktiviert wird. Während einer Messung werden synchron zu dieser Bewegung zeitlich äquidistante Bilder mit einer Zeilenkamera aufgezeichnet. Die verwendete Zeilenkamera (Teledyne DALSA Piranha4) erreicht eine maximale Rate von 200.000 Zeilen pro Sekunde (lps). Die Kamera nimmt zeitgleich bis zu zwei örtlich voneinander getrennte maximal 4.096 Bildpunkte umfassende Bildzeilen auf und wird mithilfe eines 3D-gedruckten Kameratubus aus Kunststoff mit dem Sensor verbunden. Dieser vermindert aufgrund seiner geringen Wärmeleitfähigkeit die Erwärmung und somit Ausdehnung des Sensorgehäuses durch die Abwärme der Kamera. Ein motorisiertes Bewegungssystem ermöglicht die Positionierung und Neigung des Sensors zum Messobjekt [4]. Weitere manuelle Achsen werden zur Justage des Aufbaus verwendet. Für die Rotation des Messobjektes wird eine Physik Instrumente L-611 Rotationsachse mit einem mechanisch beschädigten Lager verwendet. Diese Beschädigung bewirkt Positionierungsabweichungen des Messobjektes während dessen Rotation, welche von den Punktsensoren erfasst und während der Auswertung korrigiert werden sollen. Zwei fasergekoppelte interferometrische Punktsensoren (Abb. 3, [8]) messen simultan zur Messung des Liniensensors eine das Messobjekt umgebende bekannte plane und eine zylindrisch gekrümmte Referenzoberfläche, die ebenfalls von den Abweichungen der Rotationsachse beeinflusst werden. Ein Punktsensor misst die Abweichungen entlang der Drehachse. Der zweite Punktsensor misst die lateralen Abweichungen der Rota-

tionsbewegung. Die Messdaten dieser Sensoren werden zur Separation der Positionierungsabweichungen von der gemessenen Topographie verwendet. Die Kompensation dieser Abweichungen aus den Messdaten des Liniensensors wird anhand von Messungen an einem mittels Ultrapräzisionszerspanung hergestellten Messobjekt demonstriert. Dieses Messobjekt besitzt eine sphärisch gewölbte Oberfläche für die Messung mit dem Liniensensor und die beiden diese Struktur umgebenden Referenzflächen (Abb. 3, links). Die nachfolgenden Ergebnisse beziehen sich auf Messungen mit dem vertikal messenden Punktsensor 1.

Abb. 3: Links: Schematische Darstellung der Sensoranordnung mit Liniensensor, Punktsensoren und Referenzflächen. Rechts: Fasergekoppelter Punktsensor mit Piezo-aktuiertem Biegebalken, und diamantgedrehter Referenzfläche.

2.1 Echtzeit-Auswertung der Liniensensor-Messung

Die Auswertung der Messdaten des Punkt- und Liniensensors erfolgt in Echtzeit mithilfe eines rechenzeitoptimierten Einfrequenz-DFT-Algorithmus. Nach der initialen Bestimmung der dominanten Frequenz des Interferenzsignals wird eine Phasenauswertung ausschließlich für diese Frequenzkomponente des Signals durchgeführt. Pro Schwingungsperiode des Aktors werden zwei Phasenwerte errechnet, welche einem Unwrapping-Algorithmus zugeführt und anschließend in Höhenwerte umgerechnet werden. Die Anregungsfrequenz der Aktoren von 1 kHz begrenzt die durchschnittlich zur Verfügung stehende Dauer für eine Signalauswertung auf 500 μ s. Die Auswertung der Messdaten des Liniensensors kann von der Messsoftware auf mehrere Prozessorkerne des Hauptprozessors verteilt werden. Zudem besteht die Möglichkeit, die Unified Shader eines Nvidia Grafikprozessors für die Auswertung zu verwenden. Zur Verifizierung der Echtzeitfähigkeit des Moduls wurden Liniensensor-Messungen mit unterschiedlicher Anzahl an auszuwertenden Kamerapixeln und auswertenden Prozes-

sorkernen analysiert. Abb. 4 zeigt die durchschnittliche Dauer der Auswertung in Abhängigkeit der auswertenden Prozessorkerne eines Intel Core i7 6700K Prozessors. Zusätzlich ist die Dauer der Auswertung unter Verwendung eines Nvidia GTX1080 Grafikprozessors aufgetragen. Die Messung zeigt, dass selbst im ungünstigsten Fall der Auswertung von 4060 Pixeln mit einem Prozessorkern weniger als 500 μ s benötigt werden und somit die Bedingung für die Auswertung der Messung in Echtzeit erfüllt ist. Trotz deutlich höherer Rohrechenleistung des Grafikprozessors (GTX1080: 8.000 GFLOPS, 6700K: 100 GFLOPS) reduziert die GPU-Auswertung die Auswertedauer nur in wenigen Fällen (vgl. Abb. 4). Grund dafür kann die verhältnismäßig geringe Datenmenge von 190 kByte sein, die pro Auswertungszyklus vom Grafikprozessors verarbeitet wird, wodurch nur wenige der 2.500 Shader-Einheiten ausgelastet werden können. Des Weiteren erhöht der Datentransfer in den Speicher der Grafikkarte die Dauer der Auswertung.

Abb. 4: Mittlere Dauer eines Auswertungs-Zyklus des Echtzeit-Auswertungsmoduls in Abhängigkeit der Anzahl der zur Auswertung verwendeten Prozessorkerne.

2.2 Achsabweichungs-Kompensation

Zur Bestimmung der Abweichungen der Rotationsbewegung durch die Positionierungsabweichung der Rotationsachse wird zunächst die Topographie der zylindrischen Referenzfläche bestimmt. Dazu werden mehrere Punktsensormessungen desselben Pfads auf der Referenzoberfläche durchgeführt. Für jede dieser Messungen wird das Profil der Referenzfläche unter Berücksichtigung der maximal

auftretenden Ortsfrequenz bestimmt. Diese Profile werden zur Kompensation des unbekannten Höhenoffsets und der Phasenverschiebung der Einzelmessungen verwendet. Der Höhenoffset resultiert aus dem relativen Messprinzip der Punktsensoren, weswegen der erste Höhenwert als Referenz für alle folgenden Werte verwendet wird. Unterschiedliche Beschleunigungstrajektorien und variierende Startzeitpunkte der Messungen führen zu Verschiebungen der gemessenen Profile. Zunächst wird der Höhenoffset durch Subtraktion von an die Messwerte angepasste Geraden eliminiert. Verschiebungen werden durch Kreuzkorrelation korrigiert, wobei zur Steigerung der Genauigkeit die Höhendaten linear interpoliert werden. Anschließend wird das Referenzprofil als arithmetischer Mittelwert der gemessenen Profile errechnet. Für jede folgende Messung wird die Differenz aus Referenzprofil und Messwert berechnet, entsprechend der radialen Messposition des Liniensensors gewichtet und für die Kompensation der Messdaten des Liniensensors verwendet. Zur Demonstration der Wirksamkeit der Kompensation wird jede Messung des Liniensensors 30-mal wiederholt. Anschließend wird die durchschnittliche Höhe entsprechend der für die Punktsensorkalibrierung verwendeten Methode bestimmt. Die Differenz aus Messwert und durchschnittlicher Höhe des Messobjektes wird zur quantitativen Bewertung der Kompensation der Positionierungsabweichung verwendet.

2.3 Messergebnisse

Abb. 5 zeigt die gemessenen Höhenwerte eines Kamerapixels des Liniensensors für das sphärische Messobjekt während einer Rotation um 5°. Der rote Graph zeigt die Höhenwerte des Liniensensors, welche sowohl die Struktur des Messobjektes als auch die überlagerten Positionierungsabweichungen beinhalten. Die bestimmten Abweichungen der Messwerte mit dem vertikal messenden Punktsensor vom kalibrierten Höhenverlauf der Referenzoberfläche sind als vertikale Abweichungen von der ebenen Rotationsbewegung in schwarz dargestellt. Der blaue Graph repräsentiert das von den Positionierungsabweichungen bereinigte Höhenprofil des Liniensensors. Das Ergebnis der Kompensation zeigt eine Reduktion der Standardabweichung der Messdaten bezogen auf die gemittelte Messobjekttopographie um 74 % von 37 nm auf 9 nm. Abb. 6 stellt die ausgewerteten Höhenwerte mehrerer Kamerapixel während der 5°-Rotation des Messobjektes mit und ohne Kompensation der Positionierungsabweichungen dar. Die Abweichungen von der gemittelten Messobjektsoberfläche konnten durchschnittlich um 75 % von 46 nm auf 11 nm reduziert werden.

Abb. 5: Gemessenes Höhenprofil an einer konstanten radialen Position des Messobjektes mit überlagerter Positionierungsabweichung (rot), vom Punktsensor erfasste vertikale Positionierungsabweichung (schwarz) und Höhenprofil nach Kompensation der Positionierungsabweichung (blau).

Abb. 6: Ergebnis der Messung eines rotierenden Messobjektes mit dem Liniensensor ohne (links) und mit (rechts) Kompensation der vertikalen Positionierungsabweichung der Rotationsachse.

2.4 Zusammenfassung und Ausblick

Die präsentierten Ergebnisse zeigen, dass eine mechanische Rotationsachse zur Positionierung des Messobjektes die Standardabweichung der gemessenen Höhenwerte erheblich beeinflusst. Diese Einflüsse können anhand der Messergebnisse einer simultanen Messung einer bekannten Referenzfläche mit einem einzelnen interferometrischen Punktsensor um mehr als 70 % reduziert werden. Die durch die Taumelabweichung bedingten gemessenen Abstandsabweichungen hängen von der radialen Messposition ab und müssen in Abhängigkeit des radialen Abstands zur Rotationsachse skaliert werden. Abweichungen, die durch Positionierungsabweichungen verursacht werden, welche ausschließlich entlang der Rotationsachse des Messobjektes auftreten, erfordern keine radienabhängige Skalierung. Die Trennung beider Abweichungsarten setzt einen weiteren Punktsensor voraus, der Abstandsänderungen gegenüber der zylindrischen Referenzfläche erfasst (Punktsensor 2 in Abb. 3, links). Dieser Sensor ist gegenwärtig noch nicht bei der Kompensation berücksichtigt.

Die Kompensation der Positionierungsabweichung wird derzeit im Anschluss an die Messung durchgeführt und nimmt, abhängig von der auszuwertenden Datenmenge, gegenwärtig noch einige Sekunden bis Minuten in Anspruch. Abschließend sei erwähnt, dass die gezeigten Ergebnisse einem Machbarkeitsnachweis der Kompensation dienen. Verbesserte Auswertungsstrategien und Kompen-

sationsverfahren sollen in Zukunft entwickelt und umgesetzt werden, um 360°-Messungen eines Messobjektes zu ermöglichen und so das volle Potential dieses Ansatzes nutzen zu können.

Danksagung: Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung. Dieses Projekt (LE 992/7-2, EH 400/4-2) ist ein gemeinsames Forschungsprojekt zwischen dem Lehrstuhl für Messtechnik im Fachbereich Elektrotechnik/Informatik der Universität Kassel und der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB).

Literatur

- [1] P. de Groot. Design of error-compensating algorithms for sinusoidal phase shifting interferometry. *Applied optics*, 48: 6788–96, 2009.
- [2] P. de Groot. Principles of interference microscopy for the measurement of surface topography. *Advances in Optics and Photonics*, 7:1–65, 2015.
- [3] H. Knell, S. Laubach, G. Ehret und P. Lehmann. Continuous measurement of optical surfaces using a line-scan interferometer with sinusoidal path length modulation. *Optics Express*, 22: 29787–29798, 2014.
- [4] S. Laubach, G. Ehret, J. Riebeling und P. Lehmann. Combination of a fast white-light interferometer with a phase shifting interferometric line sensor for form measurements of precision components. *Proc. of SPIE*, 10329, 2017. 10.1117/12.2269520.
- [5] D. Malacara. *Optical Shop Testing*. Wiley-Interscience, 3 Auflage, 2007.
- [6] O. Sasaki und H. Okazaki. Sinusoidal phase modulating interferometry for surface profile measurement. *Applied Optics*, 25:3137–3140, 1986.
- [7] M. Schake, M. Schulz und P. Lehmann. High-resolution fiber-coupled interferometric point sensor for micro- and nano-metrology. *tm - Technisches Messen*, 82.7-8:367–376, 2015.
- [8] M. Schulz und P. Lehmann. Measurement of distance changes using a fibre coupled common-path interferometer with mechanical path length modulation. *Measurement Science and Technology*, 24(6):065202, 2013.