

Optimierung der absoluten Formmessung in der Tiltet-Wave-Interferometrie

Andreas Brenner*, Gregor Scholz**, Mark-Jona Meyer**, Ines Fortmeier**, Christian Schober*,
Christof Pruß*, Alois Herkommer*

*Institut für Technische Optik, Universität Stuttgart

**Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig

mailto:andreas.brenner@ito.uni-stuttgart.de

Die Tiltet-Wave-Interferometrie ermöglicht hochgenaue Formmessungen von Asphären und Freiformflächen im Nicht-Nulltest. Die Mehrdeutigkeit der interferometrischen Phase führt jedoch zu Abweichungen in der absoluten Form. In diesem Beitrag werden zwei Methoden vorgestellt, die diese Mehrdeutigkeiten durch die Einbeziehung zusätzlicher Informationen reduzieren.

1 Einleitung

Die Formmessung von Asphären und Freiformflächen ist zentrale Voraussetzung für die Fertigung moderner optischer Systeme. Im Vergleich zu sphärischen Flächen ermöglichen Asphären leistungsfähigere Designs, stellen jedoch hohe Anforderungen an die Messtechnik. Bei interferometrischen Verfahren besteht insbesondere die Herausforderung, Oberflächenabweichungen eindeutig von Positionierungsfehlern des Prüflings zu trennen [1]. Im Rahmen dieses Beitrags werden deshalb zwei Ansätze zur absoluten Formmessung in der Tiltet-Wave-Interferometrie (TWI) untersucht, die mit zusätzlichen Informationen diese Mehrdeutigkeiten reduzieren.

2 Tiltet-Wave-Interferometrie

Die Tiltet-Wave-Interferometrie (TWI) ist ein schnelles und flexibles interferometrisches Nicht-Nulltestverfahren zur Formmessung von Asphären und Freiformflächen. Im Gegensatz zur klassischen Interferometrie wird der Prüfling nicht mit nur einer Wellenfront beleuchtet, sondern mit einem Ensemble gegeneinander verkippter Wellenfronten.

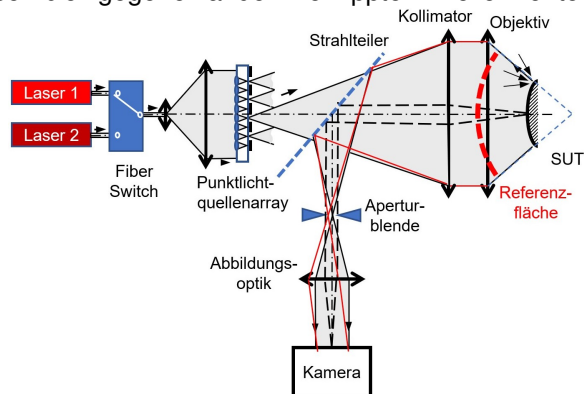


Abb. 1 Schematischer Aufbau eines Tiltet-Wave-Interferometers in Fizeau-Konfiguration für Mehrwellenlängeninterferometrie.

Die Interferometerblende filtert für jeden Bereich des Prüflings nur die bestpassende Wellenfront heraus. So entstehen Teilinterferogramme („Patches“), die zusammen den gesamten Prüfling gleichzeitig erfassen. Die für jede der verkippten Wellenfronten unterschiedlichen optischen Weglängen werden durch ein Black-Box-Modell (BBM) auf Basis von Zernikekoeffizienten berücksichtigt. Das BBM ist ein digitaler Zwilling des Aufbaus und erlaubt die Berechnung der aufgenommenen Interferogramme für einen beliebigen Prüfling an beliebiger Position. Zur Bestimmung der Koeffizienten des BBM werden zwei Referenzkugeln an über 100 verschiedenen Positionen im Prüfraum vermessen. Die Modellkorrektur des Systems passt die Koeffizienten so an, dass die modellierten Ergebnisse mit den Referenzmessungen übereinstimmen. Neben den Zernike-Koeffizienten werden bei der Modellkorrektur auch die Positionen der Referenzkugeln mitgeschätzt.

3 Prüflingsjustage mit extern gemessener Abstandsinformation

Eine Methode, Mehrdeutigkeiten zwischen Justage- und Formmessfehlern zu reduzieren, ist, die Prüflingsjustage zu verbessern und Justagefehler zu reduzieren. Dazu wurde eine mehrstufige Justagestrategie [2] unter Verwendung simulierter Interferogramme entwickelt. Zunächst wird der Prüfling axial in die Cat's-Eye-Position gebracht, indem der Defokusanteil der Differenz der simulierten und gemessenen Pfadlängen minimiert wird (siehe Abbildung 2). Anschließend erfolgt in der Messposition, die unter Zuhilfenahme eines DMI (distanzmessendes Interferometer) angefahren wird, die laterale Feinjustage: Aus dem Vergleich zwischen simulierten und gemessenen Pfadlängen und den Sensitivitäten bzgl. lateraler Translation und Verkipfung wird die Justage iterativ korrigiert. Anschließend erfolgt in der Cat's-Eye-Position eine

Nachkorrektur der z-Position. Ab dieser wird der Prüfling in die Messposition verfahren, der finale Verfahrensweg mit dem DMI getrackt und die eigentliche TWI-Messung durchgeführt.

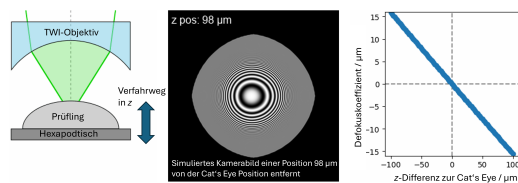


Abb. 2 Axiale Justage des Prüflings: Position des Prüflings im System (links), simuliertes Kamerabild einer entlang der optischen Achse verschobenen Position (mitte), Positionsabhängigkeit des Zernike-Defokusskoeffizienten der Differenzwellenfront zwischen Messung an Position z und simulierter Messung in Cat's Eye Position (rechts).

Mit der vorgestellten Justagestrategie wurden Messungen mit mehreren Referenzprüflingen an verschiedenen Messpositionen durchgeführt, wobei sich sehr gute Wiederholbarkeiten mit Standardabweichungen im Bereich von 50 nm für den aus absoluten Messdaten extrahierten Krümmungsradius ergibt, was für die betrachteten Prüflinge einer Abweichung in der absoluten Form von 4 nm rms entspricht. Die Quantifizierung von systematischen Abweichungen und die damit einhergehende finale Bewertung der Genauigkeit der absoluten Formmessung ist Gegenstand aktueller Untersuchungen.

4 Mehrwellenlängeninterferometrie

Auch Phasenoffsetinformationen können zur Verbesserung der absoluten Formmessung genutzt werden. Im TWI betrifft dies insbesondere die Offsets zwischen den einzelnen Interferogramm-Patches, die prinzipiell nicht durch Phasen-Unwrapping bestimmt werden können. Zur Erweiterung des Eindeutigkeitsbereichs wird Mehrwellenlängeninterferometrie (MWLI) eingesetzt, bei der zwei nahe beieinanderliegende Wellenlängen zur Generierung einer synthetischen Wellenlänge genutzt werden, die deutlich größer als die Einzelwellenlängen ist. Abbildung 1 zeigt den Aufbau: Basis bildet ein TWI in Fizeau-Konfiguration, das sich gegenüber einer Twyman-Green-Konfiguration durch eine höhere Robustheit und Phasenstabilität auszeichnet [3]. Als Lichtquelle dienen zwei stabilisierte Laser, die innerhalb von Millisekunden mittels Faserschalter umgeschaltet werden können. Die Offsetinformation kann explizit zur Patch-Verknüpfung oder implizit in die Modellkorrektur eingebracht werden. Eine Simulation des Modellkorrekturvorgangs zeigt die Verbesserung: Die Abweichungen der bei der Modellkorrektur geschätzten Positionen der Referenzkugel sind in Abbildung 3 für die Auswertung der einzelnen

Wellenlängen, bzw. für die kombinierte Auswertung dargestellt. Die Standardabweichung der Positionsschätzung konnte durch den Mehrwellenlängenansatz um den Faktor 15 reduziert werden.

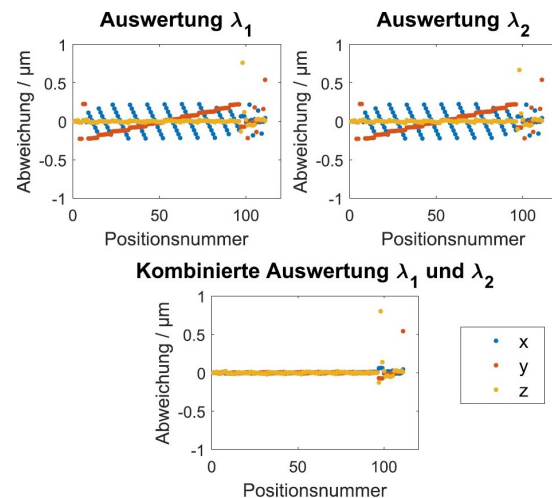


Abb. 3 Abweichungen der in der Modellkorrektur geschätzten Positionen für die Auswertung einzelner Wellenlängen (oben links bzw. rechts) und der Mehrwellenlängenauswertung (unten).

5 Zusammenfassung

Die Bestimmung der Prüflingsposition stellt eine wesentliche Limitierung für die absolute interferometrische Formmessung dar. Es wurden zwei Methoden zur Absolutmessung mit dem TWI vorgestellt: Zum Einen die Nutzung externer Abstandsinformation, die in Kombination mit einer optimierten Justagestrategie eine sehr gute Wiederholbarkeit der absoluten Formmessung zeigt. Die finale Bewertung der Methode durch Vergleich mit kalibrierten Referenzmessungen wird derzeit durchgeführt. Zum Anderen wurde durch Mehrwellenlängeninterferometrie eine Verbesserung der Positionsschätzung bei der Modellkorrektur um den Faktor 15 in der Simulation nachgewiesen.

6 Danksagungen

Gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) - Projekt Absoform - Projektnummer 496703792

Literatur

- [1] A. Gronle, C. Pruss, and A. Herkommer, "Misalignment of spheres, aspheres and freeforms in optical measurement systems," *Opt. Express* **30**(2), 797–814 (2022).
- [2] G. Scholz, D. Evers, and I. Fortmeier, "Investigation of the positioning accuracy of the Cat's Eye as a reference position in asphere-measuring interferometry," *Journal of the European Optical Society-Rapid Publications* **21**(1), 19 (2025).
- [3] C. Schober, R. Beisswanger, A. Gronle, C. Pruss, and W. Osten, "Tilted Wave Fizeau Interferometer for flexible and robust asphere and freeform testing," *Light: Advanced Manufacturing* **3**(4), 1 (2022).