

Vor- und Nachteile der chromatisch-konfokalen Spektralinterferometrie im Vergleich zur klassischen Spektralinterferometrie

Wolfram Lyda*, César Ramos de Carvalho**, David Fleischle***, Florian Mauch*, Tobias Haist*, Wolfgang Osten*

*Institut für Technische Optik, Universität Stuttgart

**GsAME - Graduate School For Advanced Manufacturing Engineering, Stuttgart

<mailto:lyda@ito.uni-stuttgart.de>

In diesem Beitrag soll durch den experimentellen Vergleich zweier Sensoren gezeigt werden, dass die chromatisch-konfokale Spektralinterferometrie durch Einschränkungen in der axialen Auflösung eine konstantere Übertragungsfunktion über den Tiefenmessbereich und mehr Flexibilität hinsichtlich Messbereich und numerischer Apertur als die Spektralinterferometrie aufweist.

1 Einführung

Sensoren nach dem Prinzip der Spektralinterferometrie (SI) [1] liefern Oberflächenmessdaten mit Submikrometerauflösung mit einer einzelnen Aufnahme. Der Nachteil des Prinzips ist die über dem Tiefenmessbereich nicht konstante Sensorübertragungsfunktion. Dies ist unter anderem darauf zurückzuführen, dass der Abtastspot auf dem Objekt außerhalb der Fokallage größer wird und die in das Spektrometer zurückgekoppelte Lichtmenge und somit die Signalmodulation mit dem Verlassen der Fokallage abnimmt. Um dem entgegen zu wirken, wird meist mit geringer numerischer Apertur (NA) gearbeitet. Im Interesse der Gewährleistung einer großen NA über einem weiten Tiefenmessbereich bei SI-Sensoren, wurde die chromatisch-konfokale Spektralinterferometrie (CCSI) entwickelt [2]. Allerdings weist auch die CCSI gewisse Einschränkungen bezüglich des Auflösungsverhaltens auf. Durch einen direkten Vergleich werden im Anschluss die Vor- und Nachteile der beiden Verfahren analysiert.

2 Grundlagen

Die SI ist ein absolutmessendes „Single-Shot“-Messverfahren auf Basis der kurzkohärenten Interferometrie. Es wird eine Breitbandlichtquelle in Referenz- und Objektstrahlengang aufgeteilt und die interferenzielle Überlagerung wird mit einem Spektrometer ausgelesen. Im Spektrometer wird ein Wavelet aufgezeichnet, dessen Frequenz sich mit dem Gangunterschied zwischen den Interferometerarmen ändert (Abb. 1a). Die Objektlage lässt sich aus der Phasenänderung über der Wellenzahl berechnen [1].

Bei der CCSI wird zur Erweiterung des Tiefenmessbereichs gegenüber klassischer SI ein chromatischer Längsfehler in den Objektstrahlengang eingebracht. Dadurch wird eine wellenlängenabhängige Lage des Abtastspots in der Tiefe erreicht.

Durch eine konfokale Diskriminierung wird die Intensität der Objektwelle im Spektrometer auf die fokussierten Wellenlängen beschränkt. Es kann ein Wavelet aufgezeichnet werden, dessen Lage und Frequenz vom Objektstand abhängt. Die Auswertung kann entweder über die Einhüllende oder analog zur SI über die Phase geschehen. Zum Vergleich wird hier bei beiden Sensoren die Phasenlage über Spatial-Phaseshifting mit einem 5-Phasenschiebealgorithmus ausgewertet [3].

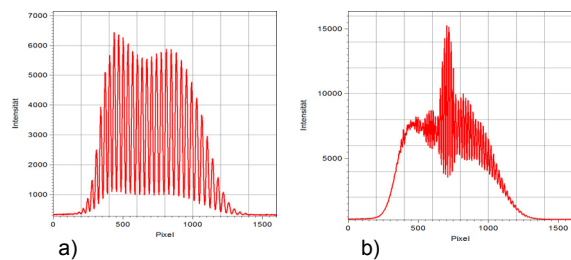


Abb. 1 Signalmodulation für a) SI und b) CCSI

3 Versuchsaufbau

Zum Vergleich wurden beide Sensorprinzipien nebeneinander aufgebaut (Abb. 2). Beide Sensoren verwenden die gleiche fasergekoppelte Breitbandlichtquelle und das gleiche Spektrometer.

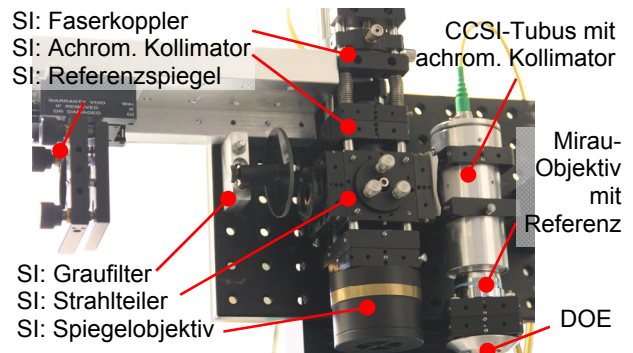


Abb. 2 Aufbau mit SI (links) und CCSI (rechts)

Beim SI-Sensor wurde auf achromatische Abbildung und Dispersionsabgleich zwischen den Interferometerarmen geachtet. Es wurde ein Spiegel-Objektiv mit einer NA von 0,5 verwendet. Bei der CCSI wurde ein „Common-Path“-Sensor mit achromatischer Kollimation und Mirau-Objektiv (Nikon, NA = 0.5) verwendet. Für die chromatische Aufspaltung wurde ein diffraktives optisches Element (DOE) in den Objektstrahlengang integriert.

Zur Positionierung der Messobjekte wurden ein Piezo-Hubtisch und ein Piezo-Lineartisch mit je 100µm Stellbereich verwendet.

4 Axiale Auflösung

Um den Tiefenmessbereich und die Tiefenaufklärung bestimmen zu können, wurde ein Spiegel mit dem Piezo-Hubtisch mit Submikrometerschritten verfahren. An jeder Position wurden 30 Messungen durchgeführt. Aus den Daten wurde das Messrauschen (RMS) und die Signalmodulation im Messbereich bestimmt (Abb. 3).

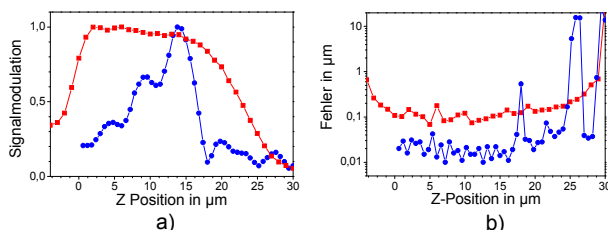


Abb. 3 a) Signalmodulation für SI (blau) und CCSI (rot) und b) das Signalrauschen im Tiefenmessbereich

Der Messbereich des SI-Sensors (NA = 0,5) liegt bei ca. 20 µm und die Standardabweichung des Höhenwertes ist besser als 0,03 µm. Die nicht sinc²-förmige Signalmodulation zwischen 0 µm und 10 µm wird durch Restaberrationen im System hervorgerufen und erweitert den Messbereich, weil das Objektlicht aufgrund der Aberrationen nicht vollständig konfokal gefiltert wird. In einem vollständig korrigierten System wäre die Halbwertbreite und somit der Messbereich daher geringer. Andererseits verringert sich bei einer vollständigen Korrektur die Abtastspotgröße und somit verbessert sich auch die laterale Auflösung.

Der Messbereich des CCSI-Sensors ist 27µm, gegeben durch die chromatische Aufspaltung des DOEs. Durch die eingeschränkte Bandbreite unter der Einhüllenden ist das Signalrauschen mit einer Standardabweichung von ca. 0,2µm schlechter als bei der SI.

5 Laterale Auflösung

Die laterale Auflösung über dem Tiefenmessbereich der Sensoren wurde ermittelt, indem orthogonale Linienschnitte eines Gitters (50µm Pitch, 2,5µm Stufenhöhe) mit beiden Sensoren aufgenommen wurden. Das Gitter wurde zwischen den

Linienmessungen im Tiefenmessbereich verschoben. In Abb. 4 sind die Ergebnisse des Linienschnitts für zwei verschiedene Objektlagen im Messbereich zu sehen.

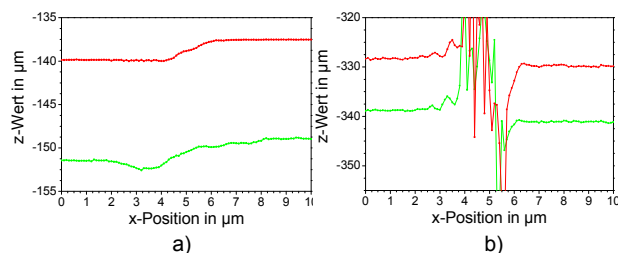


Abb. 4 Messungen über die Stufe des Gitters in der Mitte (rot) und am Rand (grün) des Tiefenmessbereichs für a) SI und b) CCSI

Die SI-Messungen zeigen im Bereich der Fokusslage (Abb. 4a, rot) einen Kantenverlauf von 2µm. Am Rand des Messbereichs ist der Kantenverlauf 6µm breit und ein Überschwinger ist zu erkennen, was auf den defokussierten Messspot zurückzuführen ist. Die CCSI weist deutliche Überschwinger im Bereich der Gitterkante auf. Dies ist auf die aufwendigere Auswertung und die eingeschränkte Signalbandbreite zurückzuführen. Vorteilhaft bei der CCSI ist, dass das Messsignal über den gesamten Messbereich eine höhere Konstanz aufweist. So können ungültige Werte leicht von gültigen unterschieden werden. Der SI-Sensor zeigt ein weniger konstantes Verhalten über den Messbereich als die CCSI. Die laterale Auflösung ist bei der SI im Fokus vergleichbar zur CCSI. Am Rand ist die Auflösung des verwendeten CCSI-Sensors bei gleicher NA ca. um den Faktor 3 besser.

6 Zusammenfassung

Die Versuche zeigen, dass die CCSI ein konstanteres Verhalten über den Messbereich zeigt, als die SI und durch die Trennung von numerischer Apertur und Tiefenmessbereich flexibler an die Messaufgabe angepasst werden kann. Für hochaufgelöste Messungen an sehr ebenen Objekten ist die SI jedoch besser geeignet.

Unser Dank gilt der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die finanzielle Förderung des Projekts unter OS 111/21.

Literatur

- [1] Schwider, J., Zhou, L., "Dispersive Interferometric Profilometer", Opt. Lett. 19, 995-997 (1994)
- [2] Papastathopoulos, E., Körner, K., Osten, W., "Chromatic Confocal Spectral Interferometry" in Applied Optics 45, 32, 8244-8252 (2006)
- [3] Debnath, S. K., Kothiyal, M. P., Kim S. W., "Evaluation of spectral phase in spectrally resolved white-light interferometry: Comparative study of single-frames techniques" in Optics and Lasers in Engineering 47, 11, 1125-1130 (2009)