

Hochauflösendes 3D-Messsystem auf Basis eines neuartigen digitalholografischen Multilambda-Sensors

M. Pfeifer*, M. Fratz*, D. Carl*, D. Skoczowsky**, D. Giel*, A. Heuer**, H. Höfler*

*Fraunhofer Institut für Physikalische Messtechnik (IPM)

**Lehrstuhl Photonik, Institut für Physik, Universität Potsdam

mailto: markus.fratz@ipm.fraunhofer.de

Es wird ein inlinefähiges, hochauflösendes digitalholografisches Sensorsystem vorgestellt. Bei einem Messbereich von 10 mm wird eine Tiefenaufklärung von weniger als 10 μm erreicht. Die Mess- und Auswertzeit liegt bei gerade einmal 2 s. Durch das entwickelte Lasersystem können zur Rekonstruktion reproduzierbar synthetische Wellenlängen von 450 μm bis 25 mm generiert werden.

1 Einführung

Die topographische Inline-Vermessung hochpräziser Funktionsflächen stellt an das verwendete optische Messsystem hohe Anforderungen. So sollen Topographien mit Tiefenausdehnungen von einigen Millimetern mit μm - oder sogar sub- μm -Genauigkeit inline gemessen werden. In der Praxis scheitern herkömmliche interferometrische Verfahren an der Verstetigung der modulo 2π vorliegenden Phasenkarten. Der Lösungsansatz des vorgestellten Systems besteht darin, die Messungen bei fünf benachbarten Wellenlängen zur Erzeugung von sogenannten synthetischen Wellenlängen unterschiedlicher Größe zu verwenden. Dabei werden mehrere große synthetische Wellenlängen zur Entfaltung der mit kleinerer synthetischer Wellenlänge rekonstruierten Phaseninformation verwendet. Der Einsatz von Graphikkarten-gestützten Algorithmen zur Rekonstruktion und Berechnung der Phaseninformationen ermöglicht Auswertzeiten im Sekundenbereich. Das entwickelte Lasersystem gewährt neben kurzen Schaltzeiten unter 100 ms zwischen den fünf Einzelwellenlängen eine hohe spektrale Stabilität, welche aufgrund der teils sehr nahe beieinander liegenden Wellenlängen (16 - 900 pm) notwendig ist.

2 Messprinzip

Das vorgestellte Sensorsystem beruht auf dem Messprinzip der Digitalen Mehrwellenlängen Holografie. Dort wird das Messobjekt nacheinander mit verschiedenen Einzelwellenlängen kohärent beleuchtet und das am Objekt gebeugte Licht mit einer ungestörten Referenzwelle überlagert. Die dabei entstehenden Interferenzbilder zeichnet eine CCD-Kamera auf. Die numerische Rekonstruktion der komplexen Objektwelle lässt sich in drei wesentliche Schritte aufteilen:

Schritt 1: Berechnung der komplexen Objektwelle – bestehend aus Amplitude und Phase – in der Hologrammebene mit Hilfe des zeitlichen Phasenschiebverfahrens nach Cai [1]. Der Vorteil dieses

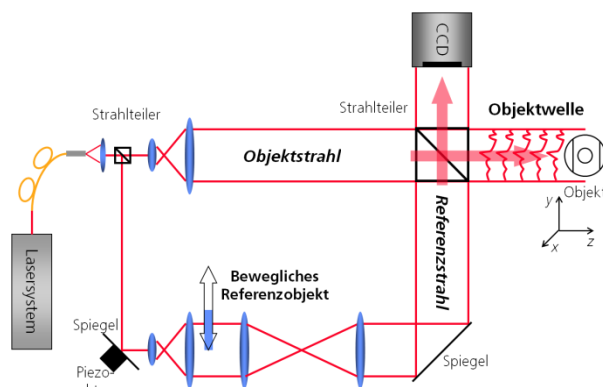


Abb. 1: Skizze des Sensorsystems.

Verfahrens besteht darin, dass die Phasenschritte zwischen den einzelnen Aufnahmen nur näherungsweise bekannt sein müssen und deshalb ein unregelmäßiger Piezoaktor (kostengünstig) eingesetzt werden kann.

Schritt 2: Propagation der komplexen Objektwelle in die Ebene des Objekts für jede Einzelwellenlänge durch numerische Auswertung des Beugungsintegrals. Bei rauen Messobjekten ist die Profilinformation aufgrund von Laserspeckles zunächst nicht direkt zugänglich. Die Phaseninformation liegt modulo 2π vor und durch die Beschränkung des Eindeutigkeitsbereichs auf die halbe Einzelwellenlänge erhält man statistische Phasenverteilungen.

Schritt 3: Generierung von synthetischen Wellenlängen zur Vergrößerung des Eindeutigkeitsbereichs. Durch Subtraktion von jeweils zwei rekonstruierten Phasenverteilungen erhält man Differenzphasenbilder, deren Phasenwerte denen entsprechen, die bei Messung mit einer Wellenlänge λ_{art} entstanden wären, für die gilt:

$$\lambda_{art} = \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2}{|\lambda_1 - \lambda_2|} \quad (1)$$

Dabei sind λ_i ($i = 1, 2, \dots$) die jeweiligen Einzelwellenlängen. Während der Eindeutigkeitsbereich in

axialer Richtung damit vergrößert wird, entspricht die laterale Auflösung weiterhin der Beugungsgrenze der Einzelwellenlängen. Zur Verbesserung des Signal-zu-Rausch-Verhältnisses werden anschließend die bei verschiedenen synthetischen Wellenlängen erhaltenen Ergebnisse miteinander kombiniert (siehe Abschnitt 4).

3 Aufbau des Sensors

Das Sensorsystem besteht im Wesentlichen aus zwei Teilen: dem Sensorkopf und dem Lasersystem.

Abbildung 1 zeigt eine Skizze des Sensorkopfs. Es handelt sich um ein modifiziertes Mach-Zehnder-Interferometer. Das Licht des Lasersystems wird über eine optische Faser in den Sensorkopf eingekoppelt und in einen Objekt- und einen Referenzstrahlengang aufgetrennt. Nach Aufweitung und Beugung am Objekt wird die Objektwelle mit Hilfe eines Strahlteilers auf dem CCD-Chip mit der ebenfalls aufgeweiteten Referenzwelle überlagert. Ein Piezoaktor im Referenzstrahl ermöglicht das zeitliche Phasenschieben [1].

Das Lasersystem besteht aus fünf gitterstabilisierten Diodenlasermodulen. Über die Gitterstabilisierung wird zum einen die Wellenlänge selektiert zum anderen eine geringe Linienbreite erreicht. Separate Temperatur- und Stromregelung garantiert eine spektrale Stabilität von bis zu 1 pm. Mit einer Zentralwellenlänge von 635 nm liefert das Lasersystem auf diese Weise kohärentes Licht bei fünf nahe beieinander liegende Wellenlängen im Abstand von 16 pm bis 900 pm. Durch Kombination der Messungen bei diesen Einzelwellenlängen mit der im vorherigen Abschnitt beschriebene Methode können damit synthetische Wellenlängen im Bereich von 500 μm bis 25 mm generiert werden. Weiter können über die in [2] beschriebene Methode des Referenzobjekts die generierten synthetischen Wellenlängen überprüft und zur aktiven Stabilisierung genutzt werden.

4 Messergebnisse

Ein Testobjekt mit zwei Stufen von 0.40 mm und 2.50 mm wurde bei allen fünf Wellenlängen vermessen und die komplexe Amplitude berechnet. Aus den Phasenbildern bei jeweils zwei unterschiedlichen Wellenlängen wurden anschließend Phasenkarten bei verschiedenen synthetischen Wellenlängen erstellt. Abb. 3 zeigt die Ergebnisse bei der längsten synthetischen Wellenlänge von 25,2 mm. Anhand des Profilschnitts erkennt man, dass zwar die beiden Höhenstufen aufgelöst werden konnten, das Signal allerdings von Rauschen überlagert ist. Dies wird anhand des ebenfalls dargestellten Histogramms deutlicher, das die Verteilung der Messwerte innerhalb der orange umrandeten ebenen Fläche darstellt. Die sich ergebende

Verteilung um den Mittelwert besitzt eine Standardabweichung von $\sigma = 360\mu\text{m}$.

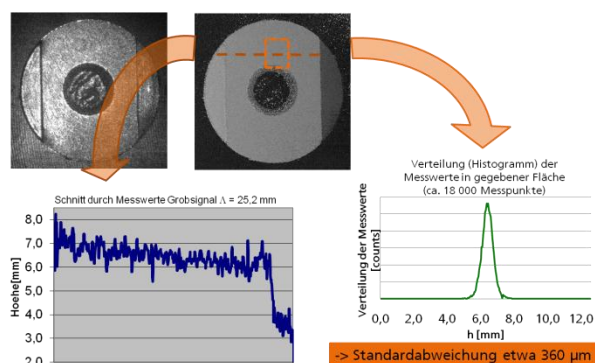


Abb. 2: Ergebnis bei der längsten synthetischen Wellenlänge. Neben einem Profilschnitt sind die pixelweise ermittelten Messwerte innerhalb des orange-umrandeten Gebietes in einem Histogramm aufgetragen.

Durch Kombination der Phasenbilder bei verschiedenen synthetischen Wellenlängen kann eine Verbesserung des Signal-zu-Rausch-Verhältnisses erreicht werden. Dabei werden die Phasenbilder bei kurzen synthetischen Wellenlängen durch Addition ganzzahliger Vielfacher der jeweiligen Wellenlänge so korrigiert, dass der große Eindeutigkeitsbereich durch die größeren synthetischen Wellenlängen erhalten bleibt. Dies verdeutlicht der Vergleich der Profilschnitte in Abb. 3. Dort sind die Profilschnitte der Messung mit der größten synthetischen (blau) nach Abbildung 3 und der kleinsten synthetischen (rot) dargestellt. Während bei der größten Synthetischen die Standardabweichung der Messwerte vom Mittelwert zu 360 μm bestimmt wurde, beträgt diese am Ende der Messung (rote Linie) nur noch 7,5 μm auf der ebenen Fläche.

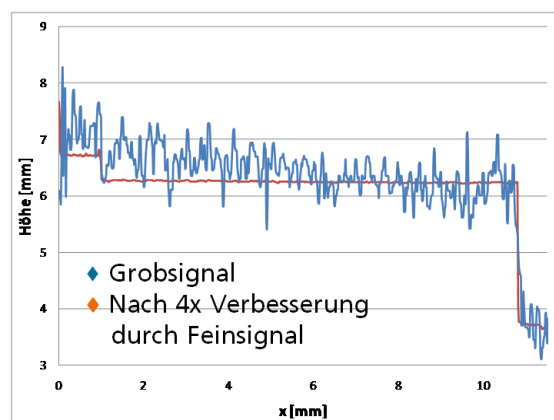


Abb. 3: Vergleich von Grob- und Feinsignal

Literatur

- [1] L.Z.. Cai et al: „Generalized phase-shifting interferometry with arbitrary unknown phase steps for diffraction objects“ in: Optics Letters **29**(2), 183-185 (2004)
- [2] D. Carl, M. Fratz, M. Pfeifer, D. Giel, H. Höfler: „Multiwavelength digital holography with autocalibration of phase shifts and artificial wavelengths“ in: Applied Optics **48**(34), H1-H8 (2009)