

Realisierung eines hochauflösenden optischen Sensors auf Basis digitaler Mehrwellenlängenholografie

Lysann Megel^{*/**}, Daniel Carl^{*}, Markus Fratz^{*}, Gerhard Knoll^{*}, Volker Jetter^{*},
Dominik Giel^{*}, Heinrich Höfler^{*}

^{*}Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik IPM, Freiburg

^{**}Technische Universität Ilmenau

<mailto:daniel.carl@ipm.fraunhofer.de>

Ein digitalholografischer Sensor, der Messungen an rauen Objekten mit relativ hohen Profilstufen ermöglicht, wird vorgestellt. Die Erzeugung einer synthetischen Wellenlänge während der numerischen Rekonstruktion führt zur Vergrößerung des axialen Eindeutigkeitsbereichs. Durch den Einsatz einer 16MP-Kamera wird ein großer Messbereich bei hoher lateraler Auflösung realisiert.

1 Einführung

In der Qualitätssicherung geht der Trend weg von der stichprobenartigen Qualitätsprüfung zur Prüfung jedes hergestellten Gutes. Damit verbunden steigen die Anforderungen an die industrielle Messtechnik bezüglich der Messzeit und des Messbereichs. Die nicht-scannenden Verfahren wie die digitale Holografie gewinnen in Folge dessen zunehmend an Bedeutung. Der digitalholografische Sensor garantiert trotz kurzer Messzeiten (<1 ms) hohe Messgenauigkeiten. Durch die Erzeugung einer synthetischen Wellenlänge werden im vorgestellten System das Problem der Speckle sowie die Beschränkung des eindeutigen Messbereichs auf die Hälfte der verwendeten Wellenlänge überwunden. Um ein großes Messfeld zu realisieren wird eine 16MP-Kamera eingesetzt.

2 Prinzip der Mehrwellenlängenholografie

In der räumlichen Phasenverteilung der von einem Objekt ausgehenden Welle ist die Information über die Profilhöhe des Objekts kodiert. Der Wertebereich der Phasenkarte ist auf das Intervall $[-\pi, \pi]$ limitiert. Dies bedeutet für Auflichtmessungen eines Höhenprofils mit Unstetigkeiten größer $\lambda/2$, dass es zu Mehrdeutigkeiten bei der Auswertung der Phasenkarte kommt.

Die Kombination von zwei Phasenkarten verschiedener Wellenlängen λ_1, λ_2 führt zu einer neuen Phasenkarte, der Differenzphasenkarte. Diese Phasenkarte ist ähnlich jener, die bei der Verwendung einer längeren Wellenlänge, der sogenannten synthetischen Wellenlänge Λ , entstanden wäre [1,2].

$$\Lambda = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{|\lambda_1 - \lambda_2|} \quad (1)$$

Die Differenzphasenkarte besitzt den Eindeutigkeitsbereich der längeren synthetischen Wellenlänge, wobei die laterale Auflösung nur durch die verwendeten Einzelwellenlängen und die numerische Apertur begrenzt wird.

Bei Objekten mit optisch rauer Oberfläche kommt es aufgrund der kohärenten Beleuchtung zur Ausbildung von Speckle, wodurch die Höheninformation in der rekonstruierten Phasenkarte erst einmal verloren scheint – statistische Gleichverteilung der Phase im Specklefeld.

Abhilfe schafft die Erzeugung einer Differenzphasenkarte. Dazu werden hier zwei Hologramme mit verschiedenen Wellenlängen aufgenommen. Liegen die zur Aufnahme verwendeten Wellenlängen nah beieinander, so sind die Specklefelder in den rekonstruierten Phasenkarten zueinander korreliert. Die modulo 2π -Subtraktion der rekonstruierten Phasenkarten liefert aufgrund der optischen Weglängendifferenzen die Höheninformationen des Objekts [1] (Abb. 1).

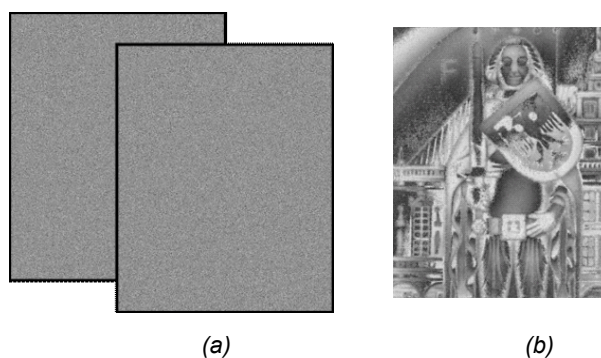


Abb. 1 Differenzphasenbildung; Objekt: 2-Euro-Gedenkmünze; Pixelanzahl: 3280 x 4096; Abbildungsmaßstab: $\beta' = -3$; (a) Phasenbilder der Einzelwellenlängen: $\lambda_1 = 642,3$ nm, $\lambda_2 = 638,8$ nm; (b) Differenzphasenbild, synthetische Wellenlänge: $\Lambda = 117,2$ μ m

3 Messprinzip und numerische Rekonstruktion

Zur Generierung der synthetischen Wellenlänge werden im beschriebenen System zwei Laser eingesetzt. Ein Objekt wird gleichzeitig mit beiden Lichtquellen beleuchtet. Folglich werden gleichzeitig zwei Hologramme aufgezeichnet, die sich aber nicht kohärent überlagern. Die Trennung der Informationen pro Hologramm erfolgt im Raumfrequenzspektrum (Abb. 2). Die Hologrammaufnahme erfolgt in Off-Axis Geometrie. Dabei gelangen Objekt- und Referenzwelle aus verschiedenen Richtungen auf die Hologrammebene. Zur räumlichen Trennung der nullten und der ± 1 . Beugungsordnungen im Raumfrequenzspektrum müssen die Referenzstrahlen der Einzelwellenlängen separat verkippt werden. Die Verkipfungen sind derart gewählt, dass keine Überlappung der beiden ersten Beugungsordnungen mit der nullten Beugungsordnung auftritt, so dass die Hologramme durch Filterung im Ortsfrequenzraum getrennt rekonstruiert werden können [3].

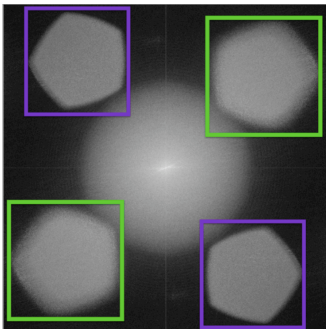


Abb. 2 Amplitudenverteilung des Raumfrequenzspektrums eines Duallambda-Hologramms (logarithmische Darstellung); Objekt: monokristalliner Siliziumwafer; markiert ± 1 . Beugungsordnung für: $\lambda_1 = 642,3 \text{ nm}$ (grün), $\lambda_2 = 638,8 \text{ nm}$ (lila)

Die Berechnung der komplexen Objektwelle erfolgt für jede der zwei Einzelwellenlängen getrennt. Im Anschluss werden die rekonstruierten Phasenkarten zur Differenzphase kombiniert (Subtraktion modulo 2π).

Abbildung 3 zeigt den schematischen Aufbau des beschriebenen digitalholografischen Sensors. Das Objekt wird mit einem Messobjektiv in die CCD-Ebene mit wählbarem Abbildungsmaßstab ($-4 \leq \beta' \leq -1$) abgebildet. Zur Erzeugung der Off-Axis Geometrie werden vor der Hologrammebene (=CCD-Ebene) den sphärischen Objektwellen jeweils Referenzwellen unter verschiedenen Winkeln überlagert. Der optische Aufbau des Systems wurde so gestaltet, dass sphärischen Objektwellen sphärische Referenzwellen überlagert werden. Die Quellpunkte der Referenzwellen liegen im gleichen Abstand zur CCD-Ebene wie die Öffnungsblende des Objektivs. In den Objektpfaden des Aufbaus befinden sich Umlenkprismen zum Ausgleich der

optischen Weglängendifferenz zwischen dem jeweiligen Objekt- und Referenzarm. Nur wenn der Wegunterschied innerhalb der Kohärenzlänge des Lasers liegt kann ein Interferenzmuster generiert werden.

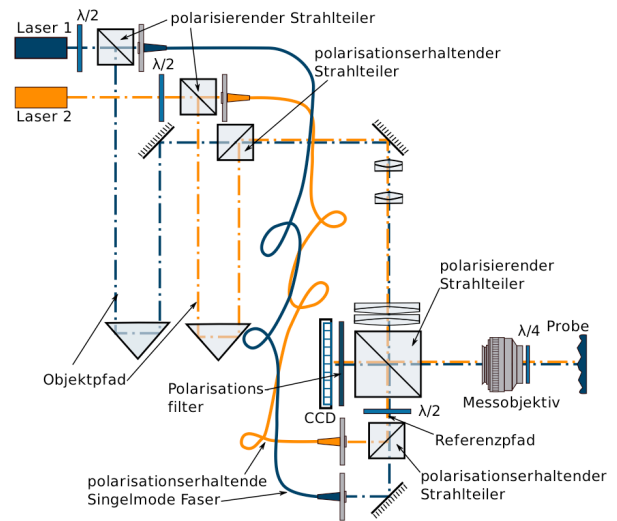


Abb. 3 Optischer Aufbau zur digitalen Mehrwellenlängenholografie in Auflichtanordnung

4 Ergebnisse

Es wurde ein berührungsloses kohärentes optisches Messsystem vorgestellt. Aufgrund der kurzen Messzeit von $<1 \text{ ms}$ ist das System vergleichsweise unempfindlich gegenüber Vibrationen. Durch die Parallelisierung der Algorithmen und Implementation auf einer Grafikkarte ist eine numerische Rekonstruktion der Duallambda-Hologramme in Echtzeit möglich. Damit ist der Sensor bestens geeignet für den Einsatz unter Produktionsbedingungen. Die Kombination von mehreren Einzelwellenlängen erlaubt eine Erweiterung des axialen Eindeutigkeitsbereichs. Mit einer lateralen Auflösungsgrenze von $>30 \mu\text{m}$ ist der optische Sensor für verschiedenste Messaufgaben einsetzbar. Durch numerisches Zoomen kann ein Objekt nachträglich in verschiedenen Ebenen fokussiert dargestellt werden.

Literatur

- [1] A. F. Fercher et al., „Rough surface interferometry with two-wavelength heterodyne speckle interferometers“ in: *Applied Optics* **24**(14), 2181-88 (1985)
- [2] D. Parshall and M. K. Kim, "Digital holographic microscopy with dual-wavelength phase unwrapping" in: *Applied Optics* **45**(3), 451-459 (2006)
- [3] E. Cucho et al.: „Spatial filtering for zero-order and twin-image elimination in digital off-axis holography“ in: *Applied Optics* **39**(23), 4070-75 (2000)