

Polarisations- und phasenschiebende Interferometrie für die simultane Vermessung der Phasenfront und der Doppelbrechung eines Objekts

S. Rothau*, K. Mantel**, N. Lindlein*

* Lehrstuhl für Optik, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

**Max-Planck-Institut für die Physik des Lichts

<mailto:sergej.rothau@fau.de>

Eine weitere Anwendung der polarisations- und phasenschiebenden Interferometrie wird vorgestellt. Dieses Messverfahren erlaubt es simultan und ortsaufgelöst direkt die Doppelbrechung und die Phasenfront eines Messobjekts in Transmission zu analysieren. Es werden der theoretische Hintergrund, die experimentelle Umsetzung, sowie Messergebnisse präsentiert.

1 Einführung

In gewissen Messsituationen ist es von Interesse, die Doppelbrechung eines Messobjekts und deren Phasentransmission zu erfahren. Idealerweise sollte dies gleichzeitig in einem Messzyklus geschehen. Mit einem solchem Messverfahren wäre es möglich, Polarisations-elemente bezüglich ihrer Polarisationswirkung und ihrer Formabweichung simultan zu vermessen. Als eine weitere mögliche Anwendung ist die optische Prüfung von Objektiven zu erwähnen, bei denen die einzelnen optischen Elemente durch das Einspannen Spannungsdoppelbrechung aufweisen können, die zeitgleich mit den Aberrationen gemessen werden kann.

Dafür bietet sich an, die Methode der polarisations- und phasenschiebenden Interferometrie (PPSI) an das gegebene Problem anzupassen. Die PPSI Methode [1] liefert die vollständige Information über die Phase und Polarisation der Objektwelle, allerdings kann dies unter Umständen für die direkt und eindeutige Objektcharakterisierung nicht ausreichen. Die Messmethode kann aber so angepasst werden, dass die Objektwelle als Informationsträger zur Auswertung der Objektinformationen verwendet wird.

2 Theorie

Bei dieser interferometrischen Messmethode wird eine bekannte Referenzwelle mit der unbekanntem Objektwelle überlagert und somit zur Interferenz gebracht. Um die Rechnung zu vereinfachen darf, ohne die allgemeine Gültigkeit der Messmethode einzuschränken, angenommen werden, dass die Referenzwelle lokal linear polarisiert ist und die Ausrichtung α' hat:

$$\vec{E}_{ref} = E_{ref}(x, y) \begin{pmatrix} \cos(\alpha'(x, y)) \\ \sin(\alpha'(x, y)) \end{pmatrix} e^{i\varphi(x, y)} \quad (1)$$

Die Eingangswelle vor dem Messobjekt mit unbekannter Doppelbrechung (Betrag Δ , Ausrichtung θ) und unbekannter Objektphase Φ darf ebenfalls als

linear polarisiert mit Ausrichtung α angenommen werden. Die doppelbrechende Eigenschaft des Objekts wird durch die Jones-Matrix $\hat{J}_R(\Delta(x, y), \theta(x, y))$ für den allgemeinen Retarder [2] beschrieben:

$$\vec{E}_{obj} = \hat{J}_R(\Delta, \theta) E_{in}(x, y) \begin{pmatrix} \cos(\alpha(x, y)) \\ \sin(\alpha(x, y)) \end{pmatrix} e^{i\Phi(x, y)} \quad (2)$$

Die Intensitätsformel (3) der resultierenden Interferenzerscheinung hat die gleiche Struktur wie die klassische Michelson-Formel. Die Gesamtintensität I_0 und der Streifenkontrast V sind wie bei der klassischen phasenschiebenden Interferometrie (PSI) [3] definiert. Der Interferenzterm IT hat bei diesem Ausdruck eine kompliziertere Form, da dieser eine Funktion der beiden Phasen Φ/φ , der zwei Polarisationsausrichtungen α/α' und der Winkel der Objektdoppelbrechung Δ/θ ist:

$$I = |\vec{E}_{obj} + \vec{E}_{ref}|^2 = I_0(1 + V \cdot IT(\varphi, \alpha, \alpha', \Phi, \Delta, \theta)) \quad (3)$$

Die Messstrategie der vorgestellten Methode gleicht der der PSI: durch die gezielte Variation der bekannten und einstellbaren Größen ($\varphi/\alpha/\alpha'$) werden unterschiedliche Interferenzerscheinungen erzeugt, detektiert und anschließend ausgewertet. Dabei existiert eine Vielzahl an möglichen Messalgorithmen [4], die sich in der Anzahl der Messschritte und -weiten unterscheiden. Ein messtechnisch interessantes Algorithmusbeispiel wird in Ab.4. vorgestellt.

3 Messaufbau

In Abb. 1 ist der verwendete Messaufbau skizziert.

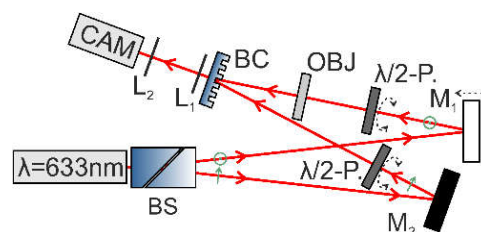


Abb. 1 Skizze des Mach-Zehnder-Interferometers

Das Messsetup ist dem Aufbau aus [5] sehr ähnlich, somit können alle Spezifikationen dieser Publikation entnommen werden. Der einzige Unterschied ist das Vorhandensein von jeweils einer drehbaren Halbwellenplatte in jedem Interferometerarm, da beide Größen α und α' variiert werden sollen.

4 Messergebnisse

Als Messobjekt wurde eine 5mm dicke Plexiglasplatte (siehe Abb. 2) mit einer etwa 5mm breiten, eingefrästen Nut verwendet. Das Objekt eignet sich sehr gut für die Demonstration der Möglichkeiten des Messverfahrens, da es durch eine äußere Einwirkung verformt und in seinen optischen Eigenschaften geändert werden kann.

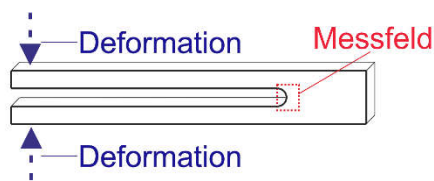


Abb. 2 Skizze des Mach-Zehnder-Interferometers

Die präsentierten Messergebnisse (siehe Abb. 3) wurden mit dem Algorithmus (3/3a) [4] gemacht, dabei wurde auf das offene Ende der Nut ein äußerer und konstanter Druck ausgeübt.

Der verwendete Messalgorithmus (3/3a) arbeitet mit drei Phasenschritten $\varphi \in \{0, 2\pi/3, 4\pi/3\}$ und drei Polarisationszuständen $\alpha = \alpha' \in \{0, \pi/4, 3\pi/4\}$, die gleichzeitig in beiden Interferometerarmen eingestellt werden. Somit wird für jeden der drei Polarisationszustände in der Referenz bzw. vor dem Objekt jeweils eine Serie mit drei phasenverschobenen Interferogrammen aufgenommen, also insgesamt 9.

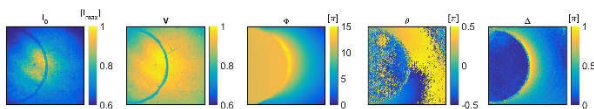


Abb. 3 Simultan gemessene Gesamtintensität I_0 , Kontrast V , Phase Φ , Stärke Δ und Ausrichtung θ der Doppelbrechung.

Zum Vergleich sind in Abb. 4 die Ergebnisse der simultan gemessenen Phase Φ und der Doppelbrechung Δ/θ vom Messobjekt ohne und mit der Deformation dargestellt. Der gemessene Betrag (farbige Kodierung) und die Ausrichtung (lokale Linienausrichtung) der Doppelbrechung wurden in einem Plot zusammengefasst.

Die Phase (siehe Abb. 4 links/oben) beim entspannten Objekt ist relativ eben und steigt leicht zur Kante hin an, was durch den Fräsprozess zu erklären ist. Die Objektdoppelbrechung (siehe Abb. 4 links/unten) ist praktisch nicht vorhanden, ihre chaotische Ausrichtung ist auf das Rauschen zurückzuführen. Im Messfeld kann zwischen den Bereichen mit und ohne Objekt nahezu nicht unterschieden werden.

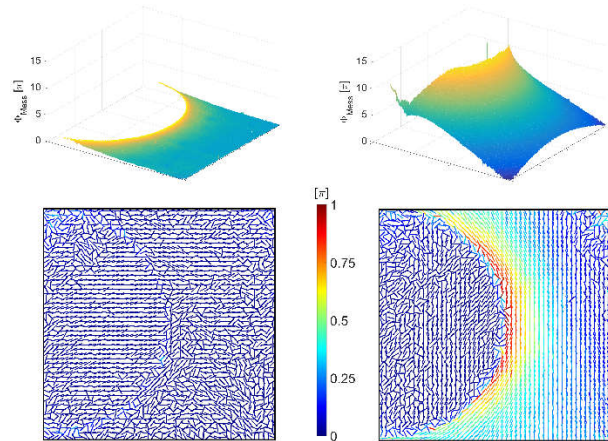


Abb. 4 Messergebnisse von Φ (oben) und Δ/θ (unten) ohne (links) bzw. mit (rechts) der Objektdeformation.

Die gemessene Phasenfront (siehe Abb. 4 rechts/oben) beim deformierten Objekt steigt viel schneller zur Kante hin an, da durch den äußeren Druck in diesem Bereich das Material zusammengedrückt wurde. Außerdem entsteht durch den äußeren Druck im Objekt eine Spannung, die sich in der gerichteten Doppelbrechung (siehe Abb. 4 rechts/unten) deutlich sichtbar macht.

5 Zusammenfassung

Es wurde eine weitere Anwendungsmöglichkeit der neuartigen Messmethode der polarisations- und phasenschiebenden Interferometrie (PPSI) vorgestellt. Mit dieser Methode ist es möglich, simultan die Doppelbrechung und die Phasentransmission des Messobjekts direkt zu vermessen.

Die Messgenauigkeiten dieses Messverfahrens sind vergleichbar mit den Genauigkeiten der etablierten Methoden. Die Umsetzung weiterer Messgeometrien, wie z. B. die Messung in Reflexion, ist denkbar und wird experimentell untersucht werden.

Literatur

- [1] S. Rothau, C. Kellermann, and "Polarization and phase shifting interferometry for the simultaneous measurement of phase and polarization," *Proc. DGAO*, **B19** (2016)
- [2] D. Goldstein and D. Goldstein, "Polarized Light", Optical engineering (CRC Press, 2011).
- [3] D. Malacara, "Optical shop testing", vol. **59** (John Wiley & Sons, 2007).
- [4] S. Rothau, K. Mantel, and N. Lindlein, "Polarization and phase shifting interferometry," vol. **1032902** of *Proc. SPIE* (2017).
- [5] S. Rothau, C. Kellermann, S. Mayer, K. Mantel, and N. Lindlein, "Polarization and phase-shifting interferometry for arbitrary, locally varying polarization states," *Appl. Opt.* **56**(5), 1422–1430 (2017).