

Simultane Vermessung der Phase und der räumlich variierenden linearen Polarisation

S. Rothau^{***}, V. Nercissian^{*}, A. Berger^{*}, N. Lindlein^{*}

^{*}Institut für Optik, Information und Photonik, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

^{**}Max-Planck-Institut für die Physik des Lichts, Erlangen

<mailto:sergej.rothau@fau.de>

Es wird ein neuartiges Messverfahren zur simultanen Vermessung der Phase und der Ausrichtung einer örtlich variierenden linearen Polarisation vorgestellt. Der umgesetzte Messaufbau und die ersten Messergebnisse, die mit einem der Messalgorithmen erstellt wurden, werden präsentiert.

1 Einführung

Optische Komponenten, die sowohl die Polarisation als auch die Phase der Wellenfront manipulieren, werden heutzutage vielfach in optischen Systemen angewendet. Es besteht die Möglichkeit solche Elemente mit nanostrukturierten Oberflächen zur Erzeugung von beliebig orientiertem, lokal linear polarisiertem Licht herzustellen [1].

Die Charakterisierung des Polarisationszustandes wird in der Regel mit einer Messung der Stokes-Parameter durchgeführt. Dadurch lässt sich zwar die lokale Phasenverzögerung des Elements, i. A. aber nicht die globale Phase der Wellenfront bestimmen. Die bekannte phasenschiebende Interferometrie (PSI) ist ein etabliertes Verfahren zum Vermessen der Phase einer gegebenen Wellenfront, allerdings i. A. mit einer konstanten Ausrichtung der Polarisation.

Die Wellenfront eines Radialgitters in einer Aluminiumschicht auf einem Glassubstrat mit einer Periode im Subwellenlängenbereich für die Wellenlänge $\lambda=633\text{nm}$ wurde vermessen [2]. Dieses optische Element erzeugt aus zirkularer Polarisation einen radialen Polarisationszustand. Dabei entsteht aber ein zusätzlicher Phasenterm in Form einer 2π -Spirale zusammen mit der gewünschten Polarisationsverteilung [3].

Im Folgenden wird ein interferometrischer Ansatz für eine orts aufgelöste simultane Messung der Polarisation und Phase eingeführt. Die momentane Beschränkung für dieses Messverfahren ist die Annahme, dass die lokale Polarisation an jedem Punkt linear ist (wie z.B. radial polarisiertes Licht). Diese neue Methode wird durch die Einführung einer neuen Reihe von Algorithmen umgesetzt, die ähnlich wie bei der PSI verwendet werden.

2 Theorie

Das Interferenzbild des Objektstrahls mit lokal variierender linearer Polarisation mit einem global

linear polarisierten Referenzstrahl kann zu Bereichen mit niedrigem oder gar verschwindendem Kontrast führen. Dieser Umstand macht eine gleichzeitige Auswertung der Polarisationsausrichtung und der Phase mit herkömmlichen Messmethoden für den ganzen Messbereich unmöglich.

2.1 Zweistrahl-Interferenz

Die Objektwelle, die die Information über das Testobjekt trägt, kann durch den Jones-Vektor (siehe Formel 1) beschrieben werden. Die örtlich variante Ausrichtung der lokal linearen Polarisation ist durch den Winkel $\Omega(x, y)$ gegeben. Die i. A. nicht konstante Phase $\Phi(x, y)$ ist die Summe der Objektphase und des zusätzlichen geometrischen Phasenterms.

Der Referenzstrahl (siehe Formel 2) hat eine lineare Polarisation mit dem konstanten Winkel ω und konstanter Phase φ . Die Amplituden der jeweiligen Strahlen sind mit u_0 bzw. u_R gegeben.

$$\vec{J}_0 = u_0(x, y) e^{i\Phi(x, y)} \begin{pmatrix} \cos(\Omega(x, y)) \\ \sin(\Omega(x, y)) \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$\vec{J}_R = u_R(x, y) e^{i\varphi} \begin{pmatrix} \cos(\omega) \\ \sin(\omega) \end{pmatrix} \quad (2)$$

Mit den beiden obigen Formeln lässt sich die resultierende Intensitätsverteilung H der Zweistrahlinterferenz (siehe Gleichung 3) berechnen. Dabei ist $I_0(x, y)$ die Summe der Intensitäten der Objekt- und Referenzwelle und $V(x, y)$ ist der Kontrast.

$$H = I_0 [1 + V \cos(\Phi - \varphi) \cos(\Omega - \omega)] \quad (3)$$

Mit Gleichung 3 lassen sich die Bereiche mit verschwindendem Kontrast erklären. Wenn die Polarisation am Ort (x, y) im Objektarm orthogonal zu der Referenzarmpolarisation ist, führt dies zum vollständigen Verlust des Kontrastes [4].

2.2 Messalgorithmen

Bei der Aufnahme der Messbilder wird sowohl die Phase geschoben, als auch die Polarisationsausrichtung der Referenzwelle gedreht. Die Auswertelgorithmen unterscheiden sich in der Anzahl und in den Werten der verwendeten Phasenschritte ϕ_i und der Drehwinkel ω_j . Die Wahl dieser Werte beeinflusst die Robustheit der Auswertemethoden gegenüber Stellfehlern, nicht-linearem Verhalten des Detektors und externer Vibrationen [5].

3 Messaufbau

Der Messaufbau ist ein modifiziertes Mach-Zehnder-Interferometer (siehe Abb.1).

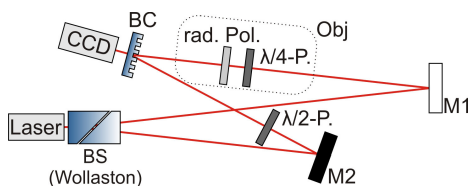


Abb. 1 Skizze des verwendeten Messaufbaus

Im Referenzarm wird die Ausrichtung der linearen Polarisation durch die Drehung einer Halbwellenplatte durchgeführt. Der Spiegel (M1) ist beweglich gelagert, um das Phasenschieben zu ermöglichen. Der nahezu senkrechte Einfall auf die Spiegel ist notwendig, um den Einfluss der Reflexion auf die Polarisationszustände der Lichtwellen zu minimieren.

Als Strahlteiler (BS) wird ein Wollaston-Prisma verwendet. Das erlaubt eine stufenlose Änderung des Intensitätsverhältnisses zwischen der Objekt- und der Referenzwelle und ermöglicht einen kleinen Divergenzwinkel zwischen den Interferometerarmen.

Als Strahlvereiniger (BC) wird ein spezielles Phasengitter eingesetzt. Die Gitterparameter - wie die Periode, das Tastverhältnis und die Ätztiefe - wurden hinsichtlich der Beugungseffizienz und der Beugungswinkel optimiert. Das Gitter ist polarisationsunabhängig, was eine Vereinigung aller Polarisationszustände möglich macht.

4 Messergebnisse

Die Messergebnisse (siehe Abb. 2) des lokalen Polarisators aus Abschnitt 1 wurden aus Daten berechnet, die durch den 5-4-Messalgorithmus aufgenommen wurden. D.h. es wurden Messbilder mit jeweils fünf Phasenschritten für vier Polarisationsorientierungen ermittelt.

Die Ergebnisse stimmen mit den Erwartungen überein. Die Polarisationsausrichtung entspricht einem radialen Polarisationszustand, die gemessene Phase erhält neben der Objektphase den zusätzlichen 2π -Spiralterm.

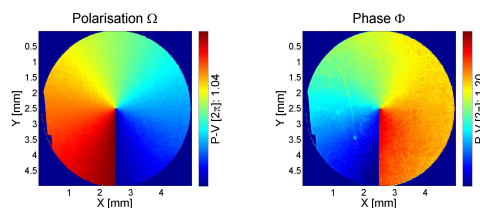


Abb. 2 Simultan gemessene Polarisationsausrichtung und Phase des radialen Polarisators

Der geometrische Phasenterm lässt sich numerisch von dem Phasenergebnis abziehen (siehe Abb. 3 links). Die reine Objektphase kann auch durch eine zusätzliche Messung ermittelt werden. Bei der zweiten Messung muss die Drehrichtung der zirkularen Polarisation umgedreht werden. Dadurch ändert sich auch das Vorzeichen der Spiralphase. Durch die anschließende Addition der beiden Phasenergebnisse erhält die reine Objektphase (siehe Abb. 3 rechts).

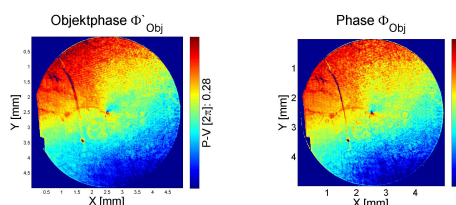


Abb. 3 Gemessene Objektphase: mit numerisch abgezogenem Spiralterm (links); Summe zweier Phasen mit rechts und links zirkularer Einfallspolarisation (rechts)

5 Zusammenfassung

Die simultanen Messungen der Phase und des Polarisationswinkels einer lokal linear polarisierten Welle stimmen mit der Theorie sehr gut überein. Aktuell werden weitere Messalgorithmen auf ihre Genauigkeit und Robustheit gegenüber stochastischen Fehlern und dem Einfluss elliptischer Polarisation statt linearer Polarisation untersucht.

Literatur

- [1] S. Rothau, et. al.: „Künstliche nanostrukturierte Polarisations-elemente“ 114. Jahrestagung der DGaO, Braunschweig, p. B6 (2013) URL <http://www.dgao-proceedings.de>
- [2] Z. Ghadyani, et al.: „Concentric ring metal grating for generating radially polarized light“ in: Appl.Opt.**50**, 2451-2457 (2011)
- [3] Z. Bomzon, et al.: „Formation of radially and azimuthally polarized light using space-variant sub-wavelength metal stripe gratings“ in: Appl.Phys.Letters**79**: 1587-1589 (2001)
- [4] V. Nercissian, et al.: „Phase measurement of a spatially varying polarization distribution“ 113th conference of the DGaO, Eindhoven (Netherlands), p. A38 (2012) URL <http://www.dgao-proceedings.de>
- [5] A. Berger, et al.: „Evaluation algorithms for multistep measurement of spatially varying linear polarization and phase“ in: Optics Letters **37**: 4140-4142 (2012)