

Computer-generierte Polarisationshologramme zur vollständigen Kontrolle über Amplitude und Phase

Markus Fratz*, Peer Fischer*, Dominik Giel*

*Fraunhofer Institut für Physikalische Messtechnik IPM, Freiburg

<mailto:markus.fratz@ipm.fraunhofer.de>

Vorgestellt werden computergenerierte Polarisationshologramme (CGH), mit denen erstmals sowohl Phase als auch Amplitude einer Lichtwelle punktweise eingestellt werden. Hergestellt werden diese CGHs durch Laserdirektbelichtung Azobenzene-basierter Polymere in nur einem Prozessschritt. Die Herstellung dieser CGHs und deren experimentelle Charakterisierung mit Beugungseffizienzen von rund 80% werden dargestellt. Die so hergestellten CGHs, erzeugen Wellenfronten, die mit bestehenden Verfahren nicht oder nur mit erheblichem Aufwand erzielt werden könnten.

1 Einführung

Computer-generierte Hologramme (CGHs) und diffraktive Optiken haben sich in verschiedenen Anwendungsfeldern der Optik etabliert wie etwa der Strahlformung, der Prüfung optischer Komponenten oder der Abbildungsoptik. Konventionelle CGHs beeinflussen entweder die Amplitude oder die Phase einer Wellenfront. Für bestimmte Anwendungen ist dagegen eine gleichzeitige Modulation von Amplitude und Phase notwendig.

Als eine spezielle Variante von Hologrammen stehen Polarisationshologramme zur Verfügung. Ihre optische Funktion beruht darauf, dass eine räumlich variierende Doppelbrechung vorliegt. Die Doppelbrechung ist dabei charakterisiert durch die Drehlage ρ der Hauptachsen der Doppelbrechung und den Brechzahlunterschied für zwei Lichtwellen, von denen eine parallel zur schnellen und die andere parallel zur langsamen der beiden Hauptachsen polarisiert ist. Bei vorgegebener Wellenlänge führt dieser Brechzahlunterschied zu einer Phasenverzögerung δ der beiden beschriebenen orthogonal zu einander polarisierten Lichtwellen und charakterisiert damit die Stärke der Doppelbrechung.

Herstellbar sind solche doppelbrechenden Strukturen z. B. durch Direktbelichtung Azobenzene-basierter Polymeren [1]. Bei Beleuchtung mit linear polarisiertem Licht kurzer Wellenlänge (z.B. unter 550 nm) richten sich molekulare Strukturen orthogonal zur Polarisationsrichtung des Lichts aus. Dieser Orientierungszustand bleibt nach Ende der Beleuchtung erhalten. Auf längerwelliges Licht (z.B. 670 nm) wirken die orientierten Molekülstrukturen doppelbrechend.

2 Experimenteller Aufbau

Durch reine Phasen-SLM auf Flüssigkristallbasis können 2D-Polarisationsverteilungen erzeugt wer-

den (Davis *et al.* [2]). Durch geeignet polarisierte Beleuchtung wird dabei in jedem SLM-Pixel lineare Polarisation erzeugt, deren Drehlage durch die Phasenverzögerung im jeweiligen SLM-Pixel definiert wird und somit pixelweise eingestellt werden kann. Ein Laboraufbau, der diesen Effekt nutzt, ist in Abbildung 1 zu sehen.

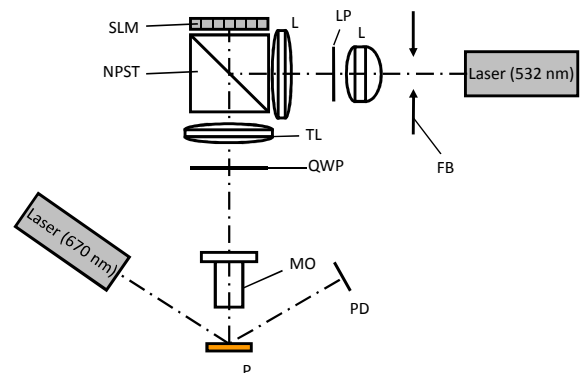


Abbildung 1 Laboraufbau zur Belichtung von Polarisationshologrammen in Azobenzenen.

Dazu wird der Strahl eines frequenzverdoppelten Nd:YAG-Lasers durch eine Blende (FB) apodisiert und durch zwei Linsen (L) aufgeweitet. Die Linsen bilden dabei die Blende (FB) in die Ebene des SLM ab, so dass FB als Feldblende wirkt. Ein Linearpolarisator (LP) sorgt dafür, dass die Polarisation des Laserstrahls unter 45° gegenüber der Senkrechten liegt. Die Beleuchtung des SLM erfolgt über einen nicht-polarisierenden Strahlteiler (NPST). Anschließend wird der SLM mit Hilfe einer Tubuslinse (TL) und eines 10x-Mikroobjektivs (NA 0,3) scharf in die Ebene der Azobenzenschicht (P) abgebildet. Diese wurde durch Rotationsbeschichtung (spin-coating) auf einen Al-Spiegel gebracht. Die Viertelwellenplatte (QWP) sorgt dafür, dass die gewünschten Polarisationszustände gemäß der Anordnung aus [2] erzielt werden können. Ein zusätzlicher Laser (670 nm) beleuchtet das

Azobenzen-Substrat an der Stelle, auf die der SLM abgebildet wird und wird gebeugt, sobald ein Polarisationshologramm mit der beschriebenen Anordnung entsteht. Der Photodetektor (PD) ist derart positioniert, dass das gebeugte Licht gerade dann auf ihn fällt, wenn ein Gitter mit einer Periode von 16-SLM-Pixeln in der Azobenzen-Schicht erzeugt wird. Während der Belichtung eines solchen Polarisationsgitters kann mit dieser Anordnung die Beugungseffizienz des gerade erzeugten Polarisationsgitters online beobachtet werden. Diese erreicht nach etwa 10 Minuten bei den gegebenen Belichtungsbedingungen Ihren Endwert von etwa 80 % (Summe aller Beugungsordnungen).

Während der Belichtungszeit kann die Drehlage der linearen Polarisation, die von jedem einzelnen Pixel erzeugt wird, auch variiert werden. Da der Orientierungsprozess der Moleküle in der Azobenzen-Schicht reversibel ist, wird durch schnelle periodische Variation der Schreibpolarisation der bisherige Orientierungszustand teilweise oder vollständig gelöscht. Während der Belichtung kann für jedes Pixel das Verhältnis zwischen der Zeit, in der konstante Polarisation erzeugt wird (also Schreibzeit), und Zeit, in der die Polarisation moduliert wird (also gelöscht), individuell gewählt werden. Durch unterschiedliche Verhältnisse aus Schreib- und Löschezit ergeben sich unterschiedlich starke Phasenverzögerung δ , während die Orientierung während der Schreibzeit die Drehlage ρ definiert. Wird eine doppelbrechende Struktur, deren Stärke und Orientierung der Doppelbrechung lateral variiert, mit zirkular polarisiertem Licht (670 nm) beleuchtet, erzeugt eine Variation der Drehlage der Doppelbrechung eine Phasenverzögerung der Welle, die proportional zu ρ ist. Gleichzeitig führt eine Variation von δ zu einer Variation der Amplitude der Welle [3]. Auf diese Art können Polarisationshologramme für zirkular polarisiertes Licht erzeugt werden, mit denen punktweise Phase und Amplitude eingestellt werden kann.

3 Ergebnis

Um die Möglichkeit zur Herstellung von Polarisationshologrammen, die Amplitude und Phase einstellen können, experimentell zu prüfen, wurde ein Beispielhologramm hergestellt. In Abbildung 2 (a) und (c) sind die Zielverteilungen von Amplitude (a) und Phasen (c) dargestellt. Ein Hologramm zur Erzeugung dieser Zielverteilungen wurde mit dem beschriebenen Verfahren hergestellt und anschließend mit einem System aus der digitalholografischen Messtechnik [4] charakterisiert. Die Ergebnisse der gemessenen Amplituden- und Phasenverteilung des Hologramms sind in Abbildung 2 (b) und (d) zu sehen. Die relative Standardabweichung (RMS-Wert) zwischen Soll- und Ist-Amplitudenverteilung beträgt 18 %, der RMS-

Fehler der Phasenverteilung beträgt etwa $\lambda/20$. Die gewünschte Einstellung von Amplitude und Phase einer Lichtwelle kann mit den so hergestellten Polarisationshologrammen in guter Näherung realisiert werden.

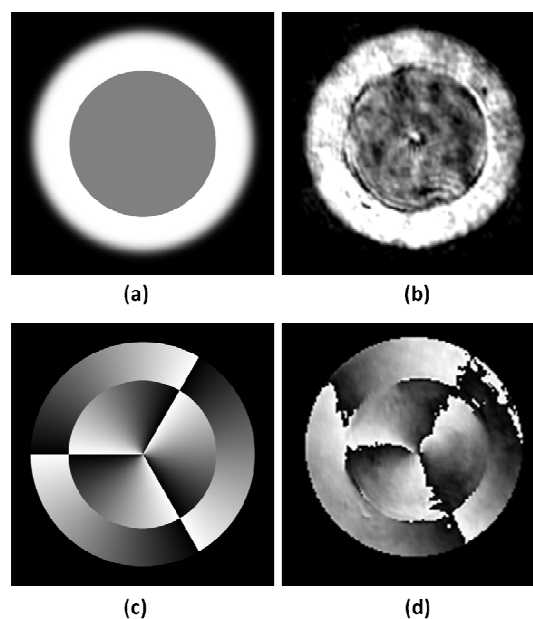


Abbildung 2 Beispiel für ein realisiertes CGH zur Einstellung von Amplitude und Phase. (a) Soll-Amplitude; (b) Gemessene Amplitude. (c) Soll-Phase; (d) Gemessene Phase

Literatur

- [1] Y. Sabi, M. Yamamoto, H. Watanabe, T. Bieringer, D. Haarer, R. Hagen, S. Kostromine, H. Berneth, "Photoaddressable Polymers for Rewritable Optical Disc Systems", *Jpn. J. Appl. Phys.* **40**, 1613-1618, (2001).
- [2] J. Davis, D. McNamara, D. Cottrell, and T. Sonehara, "Two-Dimensional Polarization Encoding with a Phase-Only Liquid-Crystal Spatial Light Modulator", *Appl. Opt.* **39**, 1549-1554 (2000).
- [3] M. Fratz, D. Giel, and P. Fischer, "Digital polarization holograms with defined magnitude and orientation of each pixel's birefringence," *Opt. Lett.* **34**, 1270-1272 (2009).
- [4] D. Carl, M. Fratz, M. Pfeifer, D. Giel, and H. Höfler, "Multiwavelength digital holography with autocalibration of phase shifts and artificial wavelengths," *Appl. Opt.* **48**, H1-H8 (2009).