

Kombinierter Müller-Jones-Formalismus zur umfassenden Optimierung spatialer Flüssigkristall-Lichtmodulatoren

M. Krüger, R. Kampmann, R. Kleindienst, S. Sinzinger

Fachgebiet Technische Optik, Technische Universität Ilmenau

mailto: stefan.sinzinger@tu-ilmenau.de

Nachfolgend werden Methoden vorgestellt, die eine präzise Kalibrierung der Modulationseigenschaften spatialer Flüssigkristall-Lichtmodulatoren (LC-SLM) ermöglichen. Hiermit ist es gelungen, trotz der Twisted-Nematic (TN) Struktur des HOLOEYE LC-R 2500 SLM eine Modulation der Intensität kleiner 3% bei einem max. Phasenhub von $2,3 \pi$ zu erreichen.

1 Einführung

LC-SLM erlauben es, eine einfallende Wellenfront räumlich zu manipulieren. Sie werden beispielsweise als adaptive Optiken [1] oder zur Abbildung durch streuende Medien verwendet [2]. Alle Anwendungen haben dabei gemeinsam, dass die Modulationseigenschaften des SLM präzise kalibriert werden müssen, um die bestmögliche Leistung zu erreichen. Im Allgemeinen wird hierbei eine reine Phasenmodulation angestrebt. Mit modernen Flüssigkristall-Modulatoren, wie z.B. den Parallel-Aligned-Nematic (PAN), kann diese Eigenschaft vergleichsweise einfach realisiert werden. Hierfür ist lediglich vor und hinter dem Modulator jeweils ein Polarisator mit der Orientierung parallel zur optischen Achse der Flüssigkristalle notwendig. Ältere SLM mit einer TN Struktur dagegen besitzen funktionsbedingt immer eine mit der Phase gekoppelte Intensitätsmodulation. Zur Reduzierung dieser unerwünschten Modulation müssen daher zusätzlich zwei Viertelwellenplatten in den optischen Aufbau integriert und eine optimale Winkeldrehung aller 4 polarisationsoptischen Elemente gefunden werden [3]. Des Weiteren tritt aufgrund der digitalen Ansteuerung bei den meisten LC-SLM der sogenannte Flicker-Effekt auf [4]. Dieser äußert sich in einer zeitlich periodischen Schwankung der Modulation des SLM.

Im nachfolgenden Kapitel werden zunächst zwei Methoden erläutert, wie die Intensitäts- und die Phasenmodulation eines TN-SLM charakterisiert und simuliert werden können. Kapitel 3 gibt anschließend einen Überblick zur Kompensation des Flicker-Effektes, woraufhin in Kapitel 4 die Optimierung des LC-R 2500 SLM vorgestellt wird.

2 Charakterisierung der Modulation

Zur Vermessung der Intensität wird die in Abb. 1 gezeigte Anordnung verwendet. Diese besteht aus einem Polarisator (Pol) und einer Viertelwellenplatte (VWP) jeweils vor und hinter dem SLM. Die Photodiode PD1 detektiert die Intensität vor dem SLM während PD2 die vom SLM modulierte Inten-

sität erfasst. Für reflektive SLM muss zusätzlich noch ein nichtpolarisierender Strahlteiler vor dem Modulator eingefügt werden.

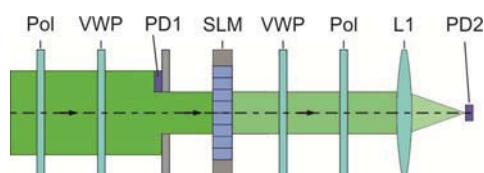


Abb. 1: Anordnung zur Messung der Intensität.

Um die Intensitätsmodulation zu charakterisieren, wird der SLM für jede zur Verfügung stehende Pixelspannung mit einem entsprechenden, gleichmäßigen Graustufenbild angesteuert und das sich ergebende Intensitätsverhältnis der Dioden wird bestimmt. Mit dem Müller-Stokes-Formalismus [3] und der Methode der Fourieranalyse nach Goldstein [5] kann dann aus den Intensitätsmessungen die Müllermatrix des SLM ermittelt werden. Hierfür werden mit dem ersten Polarisator-Wellenplatten-Paar nacheinander eine linear horizontale, vertikale und $+45^\circ$ sowie eine rechtshändig zirkulare Polarisation erzeugt. Über eine schrittweise Rotation der zweiten Wellenplatte werden die entsprechenden Stokesvektoren bestimmt, aus denen anschließend die Müllermatrix gebildet wird. Diese ermöglicht es, das Ausmaß der Intensitätsmodulation für jede beliebige Konfiguration der beiden Polarisatoren und Wellenplatten zu simulieren.

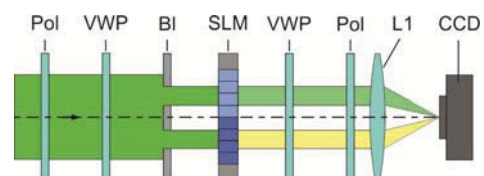


Abb. 2: Anordnung zur Messung der Phase

Die Modulation der Phase wird mit der Anordnung aus Abb. 2 charakterisiert. Eine Doppelochblende (BI) spaltet den Laserstrahl in zwei separate Strahlen auf. Für alle Grauwerte wird eine Hälfte des SLM mit dem jeweiligen Grauwert angesteuert, während die andere Hälfte konstant auf dem Wert 0 gehalten wird. Der so entstehende Referenz-

strahl und der modulierte Strahl werden zur Interferenz gebracht und mit einer Kamera detektiert. Das Beugungsmuster entspricht einer Airyscheibe mit überlagertem Kosinus, dessen Phase identisch mit der des SLM ist [6]. Um die Phasenmodulation theoretisch zu simulieren muss die Jones-Matrix des SLM ermittelt werden:

$$\bar{J} = \begin{pmatrix} j_{xx} \exp(i\varphi_{xx}) & j_{xy} \exp(i\varphi_{xy}) \\ j_{yx} \exp(i\varphi_{yx}) & j_{yy} \exp(i\varphi_{yy}) \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Die Beträge der Matrix werden direkt aus den Messungen zur Müllermatrix entnommen. Der Phasenfaktor φ_{xx} lässt sich messen, indem vor und hinter dem SLM jeweils ein linear horizontaler Polarisator positioniert wird. Für den Faktor φ_{yy} wird dieselbe Messung mit vertikalen Polarisatoren durchgeführt. Für den Kreuzterm φ_{xy} müssen eine vertikale und für φ_{yx} eine horizontale Eingangspolarisation sowie in beiden Fällen eine $+45^\circ$ Ausgangspolarisation gewählt werden.

3 Kompensation des Flicker-Effektes

Abb. 3 zeigt beispielhaft den zeitlichen periodischen Verlauf der Intensitäts- und Phasenmodulation des LC-R 2500 für einen konstanten Grauwert.

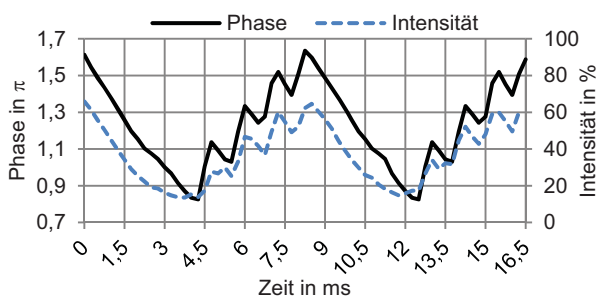


Abb. 3: Zeitlich periodische Modulation des LC-R 2500.

Aus dem Diagramm folgt, dass der Flicker-Effekt die doppelte Frequenz der Bildwiederholrate des SLM besitzt. Für die Kompensation wird ausgenutzt, dass als Detektor stets eine Kamera verwendet wird. Diese wird mit dem VSYNC Signal der SLM Elektronik getriggert, welches den Start eines neuen Bildes und somit einer neuen Flickerperiode einleitet. Dies gewährleistet, dass immer im gleichen Zeitpunkt des Flicker-Effektes ein Bild aufgenommen wird. Eine kurze Belichtungszeit der Kamera, beispielsweise $250 \mu\text{s}$, sorgt zudem dafür, dass sich die Intensität bzw. Phase während einer Aufnahme nur unbedeutend verändert. Mit Hilfe einer gezielten Verzögerung zwischen dem VSYNC Signal und der Triggerung der Kamera kann zusätzlich ein optimaler Aufnahmezeitpunkt gewählt werden. In **Abb. 3** wäre dies z.B. eine Verzögerung von ca. $8,5 \text{ ms}$, da hier ein hoher Phasenhub vorliegt. Hinsichtlich der Müller- und Jonesmatrix bedeutet dies, dass die Messungen um die zeitliche Dimension einer Flickerperiode erweitert werden müssen.

4 Optimierte Ansteuerung des LC-R 2500

Unter Zuhilfenahme der zeitlich aufgelösten Matrizen wird simuliert, welche Drehwinkel der beiden Polarisatoren sowie Wellenplatten und welcher Aufnahmezeitpunkt der Kamera eine minimale Modulation der Intensität bei einem Phasenhub größer 2π ermöglicht. Für die optimale Konfiguration des LC-R 2500 ergeben sich hieraus die in **Abb. 4** gezeigten Messkurven.

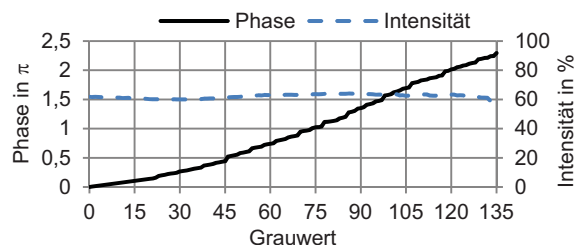


Abb. 4: Optimierte Modulation des LC-R 2500.

Die Intensität weist bei dieser Konfiguration trotz der TN-Struktur eine vernachlässigbar kleine Modulation von nur 3% auf während der maximale Phasenhub $2,3\pi$ beträgt.

5 Zusammenfassung

Es wurden Methoden vorgeschlagen, welche eine präzise Messung der zeitlich aufgelösten Müller- und Jonesmatrizen sowie eine Kompensation des Flickereffektes ermöglichen. Mit diesen Matrizen konnte per Simulation für den TN-SLM LC-R 2500 eine Konfiguration der polarisationsoptischen Elemente gefunden werden, die eine zu modernen SLM gleichwertige, nahezu reine Phasenmodulation erzeugt.

Literatur

- [1] Tiziani, Hans J.: Phase Adaptation and Correction by Adaptive Optics. In: AIP Conf. Proc. 1236, 12 (2010).
- [2] Hillman, T.R. et.al.: Digital optical phase conjugation for delivering two-dimensional images through turbid media. In: Scientific Reports. 3, 1909 (2013).
- [3] A. Márquez et.al.: Mueller-Stokes characterization and optimization of a liquid crystal on silicon display showing depolarization. In: Optics Express Vol. 16, No. 3 (2008).
- [4] J. García-Márquez et.al.: Flicker minimization in an LCoS spatial light modulator. In: Optics Express Vol. 20, No. 8 (2012).
- [5] Dennis Goldstein: Polarized Light. 2nd Edition. New York: Marcel Dekker, Inc. 2003.
- [6] G. Bader et.al.: Fast and accurate techniques for measuring the complex transmittance of liquid crystal light valves. In: Proc. SPIE Vol. 3015 (1997)