

# Design und Herstellung eines CGH-basierten Modalen Wellenfrontsensors

J. Stehr\*, F. Loosen\*, N. Lindlein\*, L. Alber\* \*\*

\* Institut für Optik, Information und Photonik,  
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU), Erlangen

\*\*Max-Planck-Institut für die Physik des Lichts, Erlangen

mailto: johannes.stehr@studium.fau.de

Modale Wellenfrontsensoren können gegenüber zonalen von Vorteil sein, z.B. wenn in einem optischen Element fabrikationsbedingt nur spezielle Aberrationsmoden zu erwarten sind. Als modale Basis fungieren dabei die Zernike-Polynome, deren Koeffizienten durch Messung der Phasenfront bestimmt werden können. Als Grund-/Sensorelement dient ein Computer-Generiertes Hologramm (CGH).

## 1 Einführung

Die etablierte Methode zur Messung der Wellenfront einer Lichtwelle ist die Messung der räumlichen Phasenverteilung, z.B. mittels Shack-Hartmann-Sensor (SHS) [1]. Unter bestimmten Voraussetzungen kann eine Messung der einzelnen modalen Komponenten der Phasenfunktion von Vorteil sein. Vor allem dann, wenn nur die Stärke weniger, bekannter Aberrationen bestimmt werden soll. Die modale Methode kann die Komplexität des Aufbaus deutlich vereinfachen und die Messgeschwindigkeit erhöhen. In der Messung kann die Phasenfunktion dabei auf beliebige Moden eines geeigneten Basissystems zur Beschreibung der Wellenfront, basierend auf Zernike-Polynomen oder einer beliebigen Linearkombination von Moden, geprüft werden.

Die durch ein optisches Element erzeugten Aberrationen können mittels Simulation abgeschätzt werden, um einen speziell auf das optische System ausgelegten Wellenfrontsensor zu entwerfen. Herzstück des Sensors ist dabei ein Computer-Generiertes Hologramm (CGH) [2]. Das Prinzip des Sensors basiert auf der Rekonstruktion einer Objektwelle durch eine spezifisch aberrierte Referenzwellenfront [3]. Im folgenden wird die quantitative Untersuchung der Funktionsweise eines modalen Wellenfrontsensors präsentiert, welcher zur genauen Messung von Defokus und Koma ausgelegt ist.

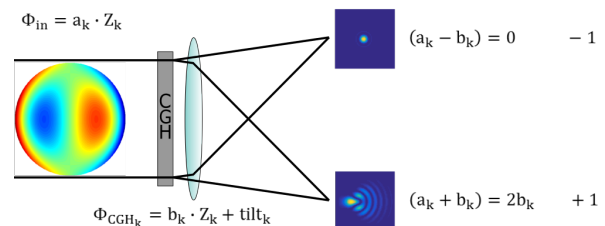
## 2 Funktionsprinzip

Die zu vermessende aberrierte Eingangswellenfront, deren Phasenfunktion  $\Phi_{in}$  im Folgenden als Satz von Zernike-Polynomen  $Z_k$  beschrieben wird, erhält durch das CGH eine zusätzliche Phase  $\Phi_{CGHk}$ , die ebenfalls im einfachsten Fall durch ein einzelnes Zernike-Polynom beschrieben werden kann. In der  $n$ -ten Beugungsordnung kann die resultierende Phasenfront für eine Zernike-Mode dargestellt werden als:

$$(a_k + n \cdot b_k) \cdot Z_k. \quad (1)$$

Dabei stellt  $a_k$  die Amplitude der eingehenden Wellenfront und  $b_k$  die Amplitude der ins CGH eingepprägten Referenzwellenfront dar. Im gezeigten Bei-

spiel (siehe Abbildung 1) wird die Korrektur von Koma skizziert, es gilt  $a_k = b_k$ . In der  $-1$ . Beugungsordnung wird der Wellenfrontfehler der eingehenden Wellenfront komplett durch den hinzuaddierten Phasenterm des CGHs kompensiert. Es resultiert ein optimales Punktbild (Point Spread Function - PSF) in der Bildebene der Fourierlinse. In der  $+1$ . Beugungsordnung wird die Aberration der eingehenden Welle durch den hinzuaddierten Phasenterm auf die doppelte Amplitude der eingehenden Wellenfront verstärkt und die PSF zeigt die doppelte Koma.

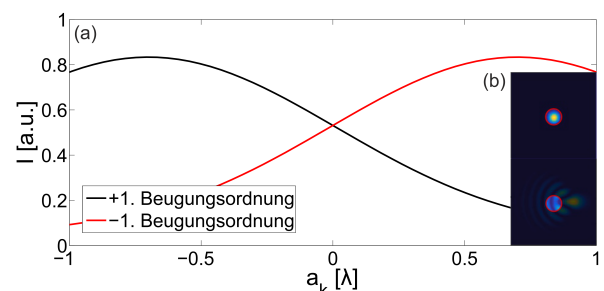


**Abbildung 1** Funktionsprinzip eines modalen Wellenfrontsensors zur Messung einer bestimmten Modenverteilung.

Die Intensität in den jeweiligen Beugungsordnungen kann dargestellt werden als:

$$I_{\pm} \propto |\mathcal{F}\{exp[i((b_k \pm a_k) \cdot Z_k + tilt_k)]\}|^2. \quad (2)$$

Um aus der Intensitätsverteilung in der Bildebene ein Messsignal zu erhalten, werden die Intensitäten der  $\pm 1$ . Beugungsordnungen innerhalb einer Lochblende verglichen (siehe Abbildung 2) [3].



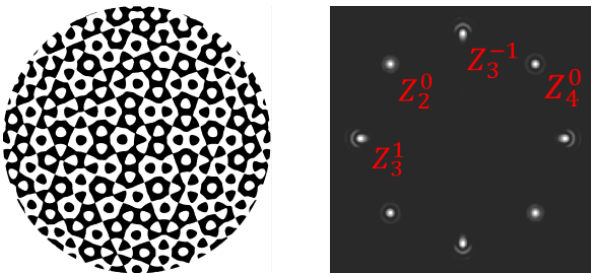
**Abbildung 2** (a) Vergleich der Intensitäten der Messsignale aus Abbildung 1, wobei die Amplitude des eingehenden Wellenfrontfehlers  $a_k$  variiert wird. (b) Radien der Lochblenden (Punktdetektoren) zur Intensitätsmessung.

### 3 Entwurf des HOE

Für jede zu messende Mode  $Z_k$ , kann das entsprechende  $\Phi_{CGH_k}$  durch Interferenz einer entsprechend aberrierten Wellenfront mit einer geeigneten, ebenen Wellenfront  $\text{tilt}_k$  erzeugt werden (siehe Gleichung 3). Die einzelnen  $\Phi_{CGH_k}$  können anschließend zum finalen Hologramm addiert werden [4]. Die Überlagerung der Phasenterme erfolgt unter verschiedenen Winkeln, sodass die einzelnen PSFs in der Detektorebene separiert werden. Durch die Binarisierung (Tastverhältnis 1:1, Stufenhöhe  $\pi$ ) ist sichergestellt, dass ein Großteil der Lichtleistung gleichmäßig auf die +1. und -1. Beugungsordnung verteilt wird, da sonst durch Stufenapproximation von Blaze-Strukturen Licht in gegenüberliegende Beugungsordnungen gelangt und somit das Messsignal verfälscht [3].

$$CGH_k = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cdot \cos(\phi_{CGH_k}) \quad (3)$$

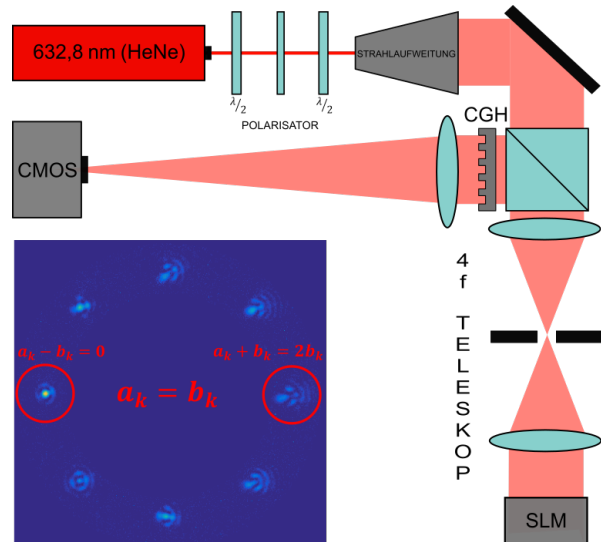
Beleuchtet man das CGH mit einer ebenen (aberrationsfreien) Wellenfront, werden die in Abbildung 3 ersichtlichen PSFs in der  $\pm 1$ . Beugungsordnung erzeugt.



**Abbildung 3** Struktur (links) und Fourier-transformierte (rechts) des CGH-Designs mit Propagation in die Brennebene der Linse. Generierung von jeweils 4 Aberrationen in der  $\pm 1$ . Beugungsordnung.

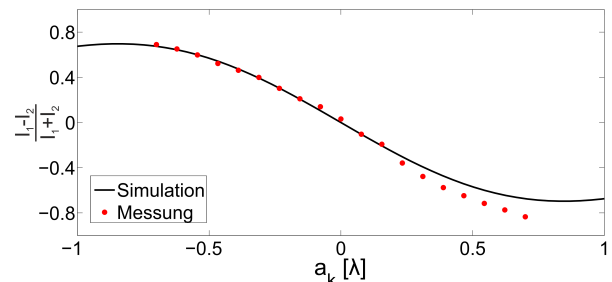
### 4 Experimentelle Verifizierung

Um den Verlauf des sensortypischen Differenzsignals  $\frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2}$  [5] zu demonstrieren, wurde ein modaler Wellenfrontsensor für die Aberrationsmoden Koma (jeweils in x-  $Z_3^1$  und y-Richtung  $Z_3^{-1}$ ), Defokus  $Z_2^0$  und sphärische Aberration  $Z_4^0$  als binäres CGH lithografisch realisiert und anhand eines Testaufbaus charakterisiert. Abbildung 4 zeigt eine Prinzipskizze des experimentellen Aufbaus, der das Funktionsprinzip des modalen Wellenfrontsensors verifiziert (gegenüberliegende PSFs zeigen gleiche Aberration mit unterschiedlichen Vorfaktoren). Dieser Aufbau beinhaltet eine Laserstrahlquelle ( $\lambda = 632,8 \text{ nm}$ ) die durch einen Polarisationsaufbau linear polarisiert wird. Eine Strahlaufweitung um den Laserstrahl auf die Apertur des Messobjekts aufzuweiten. Einen Strahlteilerwürfel für den Auflichtbetrieb des Spatial Light Modulators (SLM), zur Generierung des aberrierten Messsignals. Das CGH mit dem eingepprägten Referenzsignal. Eine Fourierlinse zur Fokussierung der PSFs auf die Detektorfläche und eine CMOS-Kamera zur Aufnahme.



**Abbildung 4** Experimenteller Aufbau zur Verifizierung des Funktionsprinzips eines Modalen Wellenfrontsensors.

Ein Vergleich mit der Simulation zeigt geringe Abweichungen (siehe Abbildung 5), die durch eine entsprechende Kalibrierung ausgeglichen werden können. Durch das Testen der ins CGH geschriebenen Moden kann das Funktionsprinzip des Sensors experimentell verifiziert werden.



**Abbildung 5** Vergleich zwischen Messung und Simulation (Testen auf Koma) der normierten Differenzen der Intensitäten in beiden Lochblenden, in Abhängigkeit von  $a_k$ .

### 5 Zusammenfassung

Das Konzept des modalen Wellenfrontsensors bietet im Hinblick auf klassische Shack-Hartmann-Sensoren (SHS) entscheidende Vorteile. So kann z.B. durch die Verwendung von Punktdetektoren ein schnelleres Auslesen der Messsignale erreicht werden, da herkömmliche SHS durch die Zeitauflösung der Kamera limitiert sind.

### 6 Literatur

- [1] B. C. Platt and R. Shack, *History and Principles of Shack-Hartmann Wavefront Sensing*, Journal of Refractive Surgery, 17(5), 2001.
- [2] B. R. Brown and A. W. Lohmann, *Complex Spatial Filtering with Binary Masks*, Appl. Opt., 5(6), 1966.
- [3] M. A. A. Neil et al., *New modal wave-front sensor: a theoretical analysis*, J. Opt. Soc. Am. A, 17(6), 2000.
- [4] C. Liu et al., *Modal wavefront sensor employing stratified computer-generated holographic elements*, Optics and Lasers in Engineering, 51(11), 2013.
- [5] S. Dong et al., *Response analysis of holography-based modal wavefront sensor*, Appl. Opt., 51(9), 2012.