

# Variables Interferometer-Objektiv für die Messung von Asphären und Freiformflächen

Alexander Bielke, Christof Pruß, Wolfgang Osten  
Institut für Technische Optik, Universität Stuttgart  
mailto: Bielke@ito.uni-stuttgart.de

Es werden die ersten experimentellen Ergebnisse eines kompakten und streureflexarmen Zoom-Objektives für interferometrische Messungen von Asphären und Freiformflächen vorgestellt. Das System bietet die Möglichkeit, die Prüfwellenfront für ein Nulltestverfahren durch Variation von Defokus und Astigmatismus an die Oberfläche des Prüflings zu adaptieren.

## 1 Einleitung

Die hochpräzise Vermessung von Asphären und Freiformflächen ist eine grundlegende Voraussetzung bei der Fertigung von optischen Oberflächen. Aktuell kommen vor allem Interferometer zum Einsatz, die bei geringer Messunsicherheit allerdings hinsichtlich der maximal messbaren Flächenkrümmungsvariation stark limitiert sind. Um Sphären verschiedener Krümmungsradien in einer konstanten Prüflings-Fokusebene interferometrisch zu vermessen ist es daher notwendig, die Schnittweite des Interferometerobjektives variabel zu gestalten. Der klassische Ansatz für ein Zoom-Objektiv mit einer Vielzahl optischer Funktionsflächen führt zu einem starken Streulichtaufkommen und damit zu reduzierter Messgenauigkeit.

Das Fokussiersystem von Alvarez [1] und Suzuki [2] besteht dagegen aus nur zwei Glaselementen mit kubischen Oberflächen und erzielt durch lateralen Versatz der Elemente den gewünschten Fokussiereffekt. Neben einer geringen Baugröße besteht außerdem die Möglichkeit, gezielt Astigmatismus in das System einzubringen. Unser Design beruht auf der diffraktiven Implementierung von Lohmann [3] und Dörband [4] und ist bei einer großen Bandbreite an messbaren Prüflingsradien auf geringes Streulicht ausgelegt.

Zusätzlich soll der einstellbare Astigmatismus genutzt werden, um die Prüfwellenfront besser an die Prüflingsoberfläche anzupassen.

## 2 Funktionsweise des diffraktiven Zoom-Objektives

Grundlage des von Lohmann [3] und Dörband [4] beschriebenen Fokussystems sind zwei diffraktive optische Elemente (DOE) mit kubischer Phasenfunktion (1):

$$\Phi_{\pm}(x, y) = \pm \frac{(3xy^2 + x^3)}{a^3} \quad (1)$$

Hierbei ist  $a$  ein anpassbarer Skalierungsparameter. Die beiden DOE mit den Phasenfunktionen  $\Phi_+$  und

$\Phi_-$  werden orthogonal zur optischen Achse hintereinander im Strahlengang platziert, so dass sich ihre Gesamtphase zu Null addiert.

Werden beide DOE lateral zueinander um  $\pm\Delta_x$  in  $x$ -Richtung versetzt, ergibt sich in der Gesamtphasenfunktion eine quadratische Abhängigkeit der Form (2):

$$\begin{aligned} &\Phi_+(x - \Delta_x, y) + \Phi_-(x + \Delta_x, y) \\ &\propto (x^2 + y^2) \frac{\Delta_x}{a^3} + \text{konst.} \quad (2) \end{aligned}$$

Der quadratische Phasenterm  $(x^2 + y^2)$  entspricht dabei einer diffraktiven Linse, deren Brechkraft mit dem Term  $\frac{\Delta_x}{a^3}$  linear verändert werden kann.

Entsprechend wird durch ein Versatz um  $\pm\Delta_y$  in  $y$ -Richtung die kombinierte Phasenfunktion zu (3):

$$\Phi_+(x, y - \Delta_y) + \Phi_-(x, y + \Delta_y) \propto \Delta_y xy \quad (3)$$

Mit dem Term  $xy$  wird dabei ein mit  $\Delta_y$  variierbarer Astigmatismusterm erzeugt.

## 3 Optimierung der Design-Parameter

Im Gegensatz zur vernachlässigbaren Dicke der Elemente und ihrem vernachlässigbaren Abstand bei Lohmann, wurden für das hier präsentierte Design mit realistischen Substratdicken von 9 mm und einem Abstand von 20 mm gerechnet. Darüber hinaus sollte das System auf den Versatz von nur einem DOE ausgelegt und das damit verbundene Abknicken der optischen Achse möglichst gering gehalten werden. Gleichzeitig musste auf eine Entkopplung von Defokus- und Astigmatismusfunktion geachtet werden.

Hierzu wurden die beiden Phasenfunktionen mit Hilfe von Zemax als „Binary 1“ optimiert. Als kritische Größe stellte sich dabei die Liniendichte der diffraktiven Strukturen heraus. Zum einen ist eine minimale Liniendichte von 200 Linienpaaren pro Millimeter als Trägerfrequenz nötig, um nicht gewünschte Beugungsordnungen aus dem System zu beugen. Zum anderen ist das obere Limit der binären Strukturen herstellungsbedingt auf etwa 450 Linienpaaren pro

Millimeter begrenzt.

Die verbleibende Variationsmöglichkeit von 250 Linienpaaren pro Millimeter wurden für den Defokus- und Astigmatismuseffekt, die Reduzierung des Restwellenfrontfehlers und der Verringerung des Abknicken der optischen Achse genutzt.

Die Optimierung wurde in Zemax unter Beachtung dieser Randbedingungen durchgeführt und das Streulichverhalten im nicht-sequenziellen Modus verifiziert. Die Schnittweite wurde auf einen Bereich von 190 mm bis 370 mm ausgelegt. Dabei lag der Gradient des verbliebenen Restwellenfrontfehlers inklusive Retracefehler maximal bei unter  $20 \lambda$  pro Messfeld-Durchmesser.

#### 4 Experimenteller Aufbau

Grundlage des Aufbaus ist ein Fizeau-Interferometer. Die zwei diffraktiven Elemente für den variablen Zoom sind direkt hinter dem Fizeau-Element, orthogonal zur optischen Achse platziert.

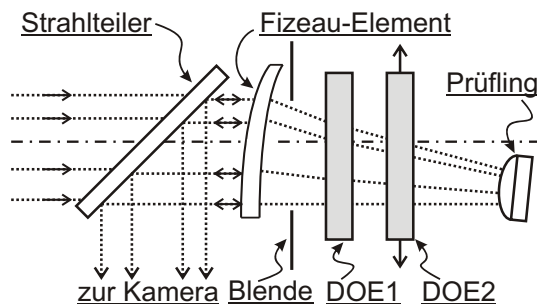


Abbildung 1 Aufbau des Zoom-Objektivs.

Durch laterales Verschieben des zweiten DOE kann der gewünschte Defokus bzw. Astigmatismus in das System eingebracht werden (siehe Abb. 1). Zur Vermeidung des zentralen Reflexes wird das Fizeau-Element off-axis verwendet.

#### 5 Experimentelle Ergebnisse

Zur Verifikation des Aufbaus wurde ein sphärischer Spiegel in der Fokusebene platziert und anhand des variablen DOE der Nulltest eingestellt.

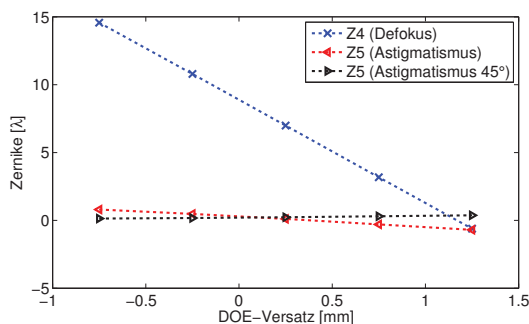


Abbildung 2 Variation des Defokus.

Ausgehend von dieser Position wurde das zwei-

te DOE um etwa  $\pm 1 \text{ mm}$  horizontal bzw. vertikal verschoben. Die resultierende Wellenfrontfehler wurden in  $500 \mu\text{m}$ -Schritten gemessen. Wie in Abbildungen 2 und 3 zu sehen ist, konnte die zu erwartende lineare Variation in Defokus und Astigmatismus erzielt werden.

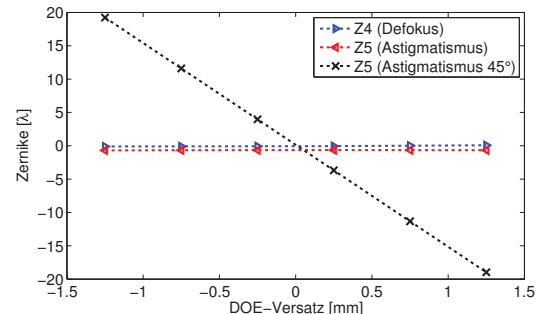


Abbildung 3 Variation des Astigmatismus.

Besonders bemerkenswert ist die klare Trennung zwischen den entsprechenden Zernike-Koeffizienten.

Der Koeffizient für Defokus (Z4) konnte nahezu linear um etwa  $15 \lambda$  variiert werden, wobei die Astigmatismus-Koeffizienten (Z5 und Z6) in etwa unverändert blieben. Die orthogonale Richtung zeigte selbiges Verhalten für den Astigmatismus (Z6) mit einer Variation von  $\pm 15 \lambda$ .

#### 6 Zusammenfassung

Wir haben das erste Design und dessen experimentellen Ergebnisse eines diffraktiven Interferometer-Zoom-Objektivs vorgestellt mit dem es möglich ist, Defokus und Astigmatismus gezielt einzustellen. Die Anordnung beruht auf dem Ansatz von Lohmann, bei dem die Position zweier DOE mit kubischer Phasenfunktion relativ zueinander verändert wird. Die experimentellen Ergebnisse zeigen eine fast vollständige Trennung der Steuerung von Defokus und Astigmatismus.

#### 7 Danksagung

Projektunterstützung: BMBF  
Projekt: ETIK (FKZ 16N12258)

#### Literatur

- [1] Alvarez et al., "Two-element variable-power spherical lenses," US patent **3,305,294**, (1967).
- [2] Suzuki et al., "Interferometer and interference measurement method," US patent **0011783** (2003).
- [3] Lohmann., "A New Class of Varifocal Lenses," Applied Optics **9/7**, 1669-1671 (1970).
- [4] Dörband, "Verfahren und System zum Vermessen einer Oberfläche eines Objektes," BRD patent **DE 10 2008 048 844 A1**, (2008).