

# Neue Designmöglichkeiten durch Zweiphotonenlithographie für ein RGB-Interferometer-Beleuchtungsmodul

Christian Schober, Lisa Lausmann, Kevin Treptow, Christof Pruss, Stephan Reichelt

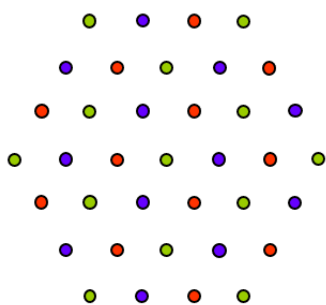
Institut für Technische Optik, Universität Stuttgart  
 mailto: schober@ito.uni-stuttgart.de

Die Zweiphotonenlithographie ermöglicht die Herstellung maßgeschneiderter Optiksyste-me. In diesem Beitrag wird ein makroskopisches hexagonales Punktlichtquellenarray für eine dreifarbige Interferometriebeleuchtungsoptik beschrieben, die mit diesem Verfahren hergestellt wird. Sie basiert auf diffraktiven Linsen höherer Beugungsordnung, was eine hohe Gesamteffizienz ermöglicht.

## 1 Einführung

Freiformflächen ermöglichen es, hohe Anforderungen an Optiksyste-me bei gleichzeitiger geringer Bauteilanzahl und minimalem Bauraum zu erfüllen [1]. Für die Herstellung solch komplex geformter Oberflächen wird ein Messsystem benötigt. Eine Messmethode ist die Tilted Wave Interferometrie (TWI) [2], die eine schnelle, flexible flächenhafte Messung ermöglicht. Herzstück des Verfahrens ist ein Punktlichtquellenarray, mit dem der Prüfling von verschiedenen Orten abseits der optischen Achse mit verkippten Wellen beleuchtet wird.

Zur Weiterentwicklung des Messverfahrens hinsichtlich der Aufnahmegeschwindigkeit wird in diesem Beitrag ein neues Beleuchtungsschema vorgestellt. Es basiert auf einer hexagonalen Punktlichtquellenanordnung, wobei keine benachbarte Punktlichtquelle Licht gleicher Wellenlänge emittiert. Dies ermöglicht die Aufnahme der TWI Interferogramme mit einem RGB-Sensor in nur einer Kamerabelichtungszeit. Die hierfür benötigte Verteilung der Punktlichtquellen ist in Abb.1 dargestellt.

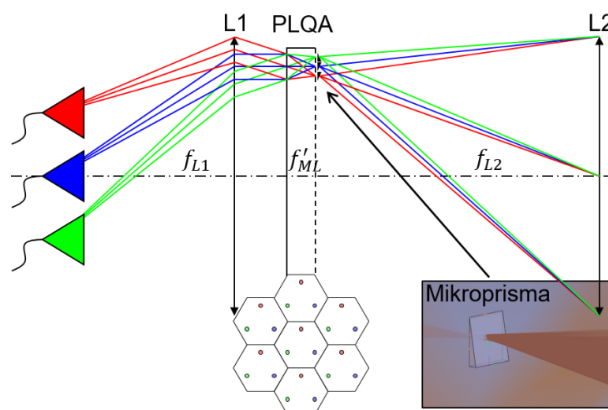


**Abb. 1** Hexagonale Verteilung von Punktlichtquellen, keine benachbarten Quellen haben dieselbe Wellenlänge.

## 2 Auslegung

Das Punktlichtquellenarray basiert auf einer hexagonalen Anordnung von Mikrolinsen mit einem Abstand von 1.73 mm. Die Beleuchtung erfolgt durch drei um die optische Achse herum versetzte Laserquellen. So bildet jede Mikrolinse jede Wellenlänge

ab, was zu einer höheren Effizienz im Vergleich zu einem auf Farbfiltern basierten Ansatz führt. Für eine höhere Lichtausbeute werden die Hauptstrahlen der Mikrolinsen durch individuell ausgerichtete Mikroprismen zentral in das nachfolgende optische System umgelenkt.



**Abb. 2** Darstellung des Beleuchtungssystems. Die außeraxiale Anordnung der Lichtquellen ermöglicht eine Abbildung jeder Wellenlänge mit jeder Mikrolinse des Punktlichtquellenarrays (PLQA). Die Hauptstrahlen werden über individuelle Mikroprismen zur Erhöhung der Lichteffizienz in das Zentrum der Apertur von Linse L2 umgelenkt.

Die Mikrolinsen werden als diffraktive Strukturen realisiert [3]. Der Ablenkungswinkel  $\theta_m$  für die Beugungsordnung  $m$  an einer diffraktiven Struktur mit der Gitterperiode  $g$  unter dem Einfallswinkel  $\theta_{in}$  ergibt sich zu

$$\sin(\theta_m) - \sin(\theta_{in}) = m \cdot \lambda / g \quad (1)$$

Zur Optimierung der Beugungseffizienz werden Sägezahnstrukturen angewandt. Die Designhöhe der Struktur ergibt sich dabei umgeben von Luft mit dem Substratbrechungsindex  $n$  zu

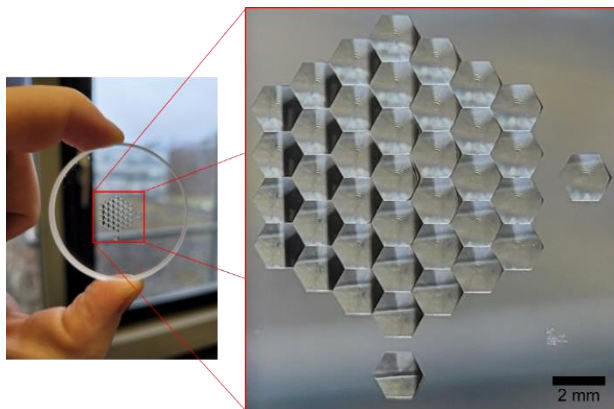
$$h = m \cdot \lambda / (n - 1) \quad (2)$$

Beide Gleichungen hängen dabei von der Wellenlänge  $\lambda$  ab. Dies führt zu chromatischen Fehlern in der Abbildung und zu Unterschieden bei der Designhöhe für die optimale Beugungseffizienz.

Zur Minimierung dieser Effekte werden in diesem Design diffraktive Strukturen höherer Ordnung verwendet [4,5]. Dabei ist es möglich, die Abweichungen sowohl für den Beugungswinkel als auch für die Designhöhe durch die Verwendung der 5. Beugungsordnung ( $\lambda=633\text{ nm}$ ), 6. Beugungsordnung ( $\lambda=532\text{ nm}$ ) und 7. Beugungsordnung ( $\lambda=457\text{ nm}$ ) zu minimieren.

### 3 Herstellung

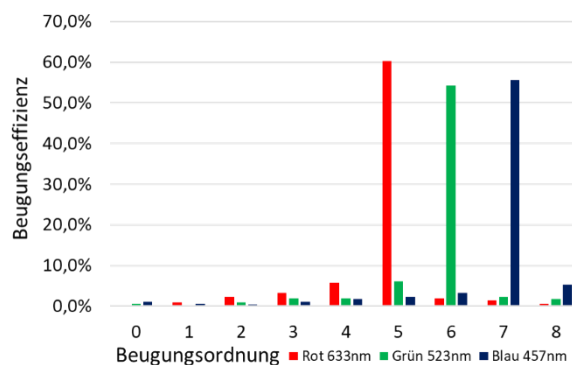
Das Element wird durch Grautonzeiphotonenpolymerisation unter Verwendung des Nanoscribe Quantum X Systems (Nanoscribe GmbH Karlsruhe, Deutschland) hergestellt. Durch eine dynamische Modulation der Laserleistung während des Druckprozesses erreicht dieses Verfahren mit weniger Schichten die benötigte optische Oberflächengüte und ermöglicht so die Herstellung makroskopischer Optiken. Als Photolack wird Nanoscribe IP-S verwendet. Mit dem Brechungsindex des Photolacks ergibt sich eine Designhöhe der Struktur von  $6.176\text{ }\mu\text{m}$ . Beim Herstellungsprozess wird jeweils eine Mikrolinse im Schreibfeld eines 10x Objektivs gedruckt, ohne dass dabei ein Stitching innerhalb der Struktur stattfindet. Zur Herstellung des hexagonalen Arrays wird dann das Substrat verschoben. Ein Druckergebnis für ein Mikrolinsenarray mit 37 Mikrolinsen ist in Abbildung 3 gezeigt.



**Abb. 3** Beispiel eines durch Grautonzeiphotonenpolymerisation hergestellten Mikrolinsenarrays mit 37 Mikrolinsen.

### 4 Charakterisierung

Zur Charakterisierung der erreichten Beugungseffizienz wurde ein Testgitter mit der kleinsten in der Struktur auftretenden Gitterperiode ( $23\mu\text{m}$ ) hergestellt. Die erreichten Intensitäten in den einzelnen Beugungsordnungen für die drei verwendeten Wellenlängen wurden mit einem optischen Leistungsmessgerät vermessen und auf die eingestrahlte Intensität normiert. Die so berechneten Beugungseffizienzen für die ersten 8 Beugungsordnungen sind in Abbildung 4 aufgetragen. In den Nutzordnungen 5./6./7. ergeben sich dabei Effizienzen von 54-60%. Diese Werte beinhalten die Fresnelverluste des nicht entspiegelten Substrats.



**Abb. 4** Gemessene Beugungseffizienz für die drei Wellenlängen  $\lambda=633\text{ nm}$ ,  $\lambda=532\text{ nm}$  und  $\lambda=457\text{ nm}$ . Deutlich zu erkennen ist die Aufspaltung in die jeweiligen Nutzordnungen 5,6 und 7.

### 5 Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurde eine dreifarbige Beleuchtungsoptik für ein interferometrisches Messsystem beschrieben. Eine hohe Gesamteffizienz wird dabei durch die Verwendung von diffraktiven Strukturen höherer Ordnung erreicht. Hergestellt wird das Punktlichtquellenarray durch die Verwendung der Grautonzeiphotonenpolymerisation, die es ermöglicht, auch makroskopische Optiken mit diesem Druckverfahren herzustellen. Es wurde ein erstes Druckergebnis mit einem Array aus 37 Mikrolinsen präsentiert. Die Beugungseffizienzen wurden anhand einer Teststruktur charakterisiert. Dabei zeigt sich die optimierte Aufspaltung der Intensitäten in die jeweiligen Nutzordnungen für die verschiedenen Wellenlängen.

### Danksagung

Wir danken der Universität Stuttgart Wissenstransferförderung für die finanzielle Unterstützung, Prof. Harald Giessen vom 4. Physikalischen Institut für die Bereitstellung des Quantum X Systems und Simon Thiele von der Printoptix GmbH für den Support bei der Herstellung des Elements.

### Literatur

- [1] K. Falaggis et al., "Freeform optics: introduction," *Opt. Express* 30, 6450-6455 (2022)
- [2] E. Garbusi et al., "Interferometer for precise and flexible asphere testing," *Opt. Lett.* 33, 2973-2975 (2008)
- [3] S. Sinzinger et al., "Microoptics", John Wiley & Sons (2006)
- [4] D. W. Sweeney et al., "Harmonic diffractive lenses," *Appl. Opt.* 34, 2469-2475 (1995)
- [5] S. Reichelt et al., "Capabilities of diffractive optical elements for real-time holographic displays," *Proc. SPIE* 6912, 69120P (2008)