

# Variable, ringförmige Belichtung zur lithografischen Herstellung rotations-symmetrischer mikrooptischer Elemente - Konzeption und Funktionsnachweis

Maria Knoblich<sup>\*, \*\*</sup>, Matthias Kraus<sup>\*, \*\*</sup>, Erik Förster<sup>\*, \*\*</sup>, Hans- Jürgen Dobschal<sup>\*</sup>, Daniela Stumpf<sup>\*</sup>, Lukas Werner<sup>\*, \*\*</sup>, Xavier Uwurukundo<sup>\*</sup>, Hartmut Hillmer<sup>\*\*</sup>, Robert Brunner<sup>\*, \*\*\*</sup>

<sup>\*</sup>Fachbereich SciTec, Ernst-Abbe-Hochschule Jena

<sup>\*\*</sup>Institut für Nanostrukturtechnologie und Analytik (INA), Universität Kassel

<sup>\*\*\*</sup>Fraunhofer Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik (IOF), Jena

mailto: [Maria.Knoblich@eah-jena.de](mailto: Maria.Knoblich@eah-jena.de)

Es wird ein Konzept für ein lithografisches Fertigungsverfahren vorgestellt, das eine schnelle und flexible Herstellung insbesondere von rotationssymmetrischen mikrooptischen Strukturen ermöglicht. Das Basisprinzip beruht auf der Kombination von zwei Axikon mit variablem Abstand. Der Funktionsnachweis erfolgt anhand von Belichtungsergebnissen einzelner binärer Ringstrukturen.

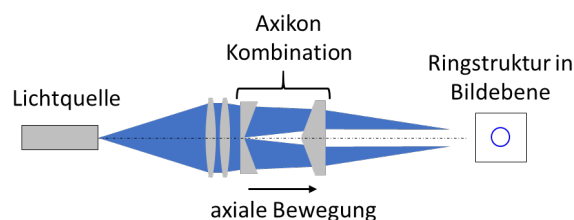
## 1 Motivation

Um den steigenden Anforderungen in der Abbildungs- und Beleuchtungsoptik gerecht zu werden, gewinnen mikrooptische Elemente zunehmend an Bedeutung. Die derzeit etablierte Herstellung mikrooptischer Strukturen erfolgt über direkt-schreibende Verfahren wie Laser- oder Elektronenstrahl-lithografie. Dabei wird das mit einem Fotolack beschichtete Substrat oft punktförmig in kartesischen Koordinaten belichtet. Hierbei haben sich die hohe Flexibilität bezüglich der geometrischen Form als vorteilhaft, lange Schreibzeiten und Probleme beim ‚Stitching‘ jedoch als nachteilig erwiesen. In abbildenden optischen Systemen werden fast ausschließlich rotationssymmetrische Komponenten eingesetzt, welche oft auch aus einer Kombination von refraktiven und diffraktiven optischen Elementen bestehen und somit hybride Systeme bilden [1]. Daher besteht die Notwendigkeit für ein Fertigungsverfahren, das eine schnelle und flexible Herstellung insbesondere von rotationssymmetrischen mikrooptischen Strukturen ermöglicht.

## 2 Konzept

In diesem Beitrag wird ein Ansatz vorgestellt, bei dem eine ringförmige Lichtverteilung mit variablem Durchmesser zur Belichtung eines binären Fotolacks auf dem Substrat genutzt wird. Das optische Konzept besteht aus einer fasergekoppelten LED mit einer Wellenlänge von 405 nm, zwei identischen Asphären sowie einer Kombination aus einem plan- konkaven und einem axial beweglichen plan- konvexen Axikon (siehe Abb. 1). Das Eintrittspinhole des Systems wird durch den Faserdurchmesser der LED (50 µm) definiert. Nach der ersten Asphäre entsteht ein kollimiertes Lichtbündel, das von der zweiten Asphäre in die Bildebene fokussiert wird. Die Axikon- Kombination ist für die Formung des ringförmigen Strahlprofils

verantwortlich. Durch Änderung des Abstandes zwischen diesen beiden Elementen wird ein Ring mit variablem Durchmesser in der Bildebene erzeugt [2-4].



**Abb. 1** Optisches Konzept zur Erzeugung des Rings mit variablem Durchmesser in der Bildebene.

Die Axikonverschiebung und der resultierende Durchmesser des Rings stehen dabei in einem linearen Zusammenhang. Der Ringradius  $R_0$  ist somit abhängig von dem Abstand  $d$  zwischen beiden Axikon und kann mit folgender Formel berechnet werden [2]:

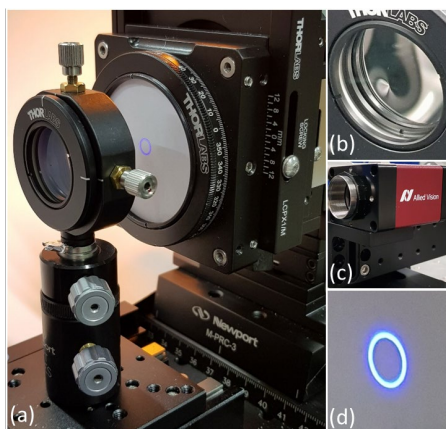
$$R_0 = \frac{d\alpha(n-1)}{1-\alpha}, \alpha < 0.175\text{rad}(10^\circ) \quad (1)$$

Der Axikonwinkel  $\alpha$  ist für beide Axikon betragsmäßig gleich und beträgt jeweils 0,0873 rad (5°). Die Axikon bestehen aus Quarzglas (Brechzahl  $n_d$  von ~1,46). Durch eine Abstandsvariation im Bereich zwischen 0 und 84 mm kann der Ringradius theoretisch zwischen 0 und 3,7 mm variiert werden.

## 3 Umsetzung und Funktionsnachweis

Auf Basis des beschriebenen optischen Konzepts ist ein Labordemonstrator entstanden, der für Belichtungsexperimente verwendet wird. Eine motorisierte Linearachse ermöglicht die axiale Bewegung und präzise Positionierung des plan- konvexen

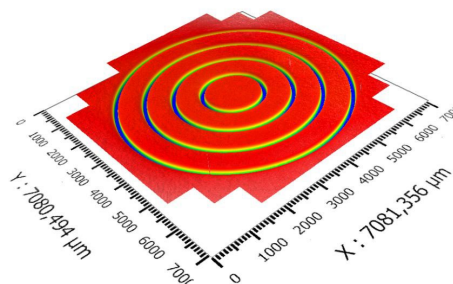
Axikons entlang der optischen Achse. Dieses ist auf dem axial beweglichen Schlitten der motorisierten Linearachse befestigt (s. Abb. 2(a) und 2(b)). Um die exakte Lage der beiden Axikons zueinander und im Raum einzustellen, werden zwei justierbare Fassungen verwendet. Die Beurteilung des Justierergebnisses erfolgt mit Hilfe einer CCD-Kamera (s. Abb. 2(c)), deren Sensorfläche hierfür in axialer Richtung in die Bildebene des optischen Systems positioniert werden muss. Die ringförmige Lichtverteilung kann optisch auch auf einer hellen Mattscheibe sichtbar gemacht werden (s. Abb. 2(d)). Für die Belichtung wird das mit dem Fotolack beschichtete Substrat (Belichtungsprobe) in der Substrataufnahme (s. Abb. 2(a)) befestigt. Ebenso wie der Sensor der CCD-Kamera muss auch die Oberfläche der Belichtungsprobe im Fokus der ringförmigen Lichtverteilung axial positioniert werden. Sowohl für die axiale als auch für die laterale Justage sind Justierschrauben an der Substrataufnahme vorgesehen.



**Abb. 2** Detailansicht Labordemonstrator mit (a) Schlitten der Linearachse, montiertem plan- konvexen Axikon und Substrataufnahme, (b) vergrößerter Ansicht des gefassten plan- konvexen Axikons (c) CCD- Kamera zur Beurteilung des Justierergebnisses und (d) ringförmiger Lichtverteilung in der Bildebene

Für die Belichtungsexperimente kommt der binäre Fotolack AZ®1505 (Merck KGaA) mit einer Dicke von ca. 400 nm zum Einsatz [5]. Die Leistung der fasergekoppelten LED wird auf einen konstanten Wert von 10  $\mu$ W eingestellt und vor jeder Belichtung mit einem Leistungsmesser in der Bildebene überprüft. Um eine konstante Belichtungs-dosis unabhängig vom Ringdurchmesser zu erzielen, wird die Belichtungszeit an die jeweilige Ringfläche (abhängig von der axialen Position des plan- konvexen Axikons) angepasst. Die belichtete Probe wird anschließend unter Reinraumbedingungen entwickelt und dann mit einem Weißlichtinterferometer vermessen. Mit der beschriebenen Vorgehensweise beim Belichtungsvorgang konnten Ringe mit unterschiedlichen Durchmessern, aber mit vergleichbaren Ringbreiten im Fotolack hergestellt werden. In Abb. 3 ist eine weißlichtinterferometrische Aufnahme von belichteten und entwickelten binären Ringstrukturen mit Innendurchmessern von ca. 1,5 mm, 3 mm, 4,5 mm und 6 mm bei einer Ringbreite von jeweils  $\sim 75 \pm 5 \mu$ m zu sehen.

trische Aufnahme von belichteten und entwickelten binären Ringstrukturen mit Innendurchmessern von ca. 1,5 mm, 3 mm, 4,5 mm und 6 mm bei einer Ringbreite von jeweils  $\sim 75 \pm 5 \mu$ m zu sehen.



**Abb. 3** Weißlichtinterferometrische Aufnahme der Belichtung von konzentrischen Ringen im binären Fotolack AZ®1505

#### 4 Zusammenfassung und Ausblick

Im vorgestellten Konzept wird eine ringförmige Lichtverteilung mit variablem Durchmesser durch eine Kombination aus einem plan- konkaven und einem axial beweglichen plan- konvexen Axikon erzeugt. Mit den vorliegenden Belichtungsergebnissen konnte der prinzipielle Funktionsnachweis erbracht sowie die Eignung für lithografische Anwendungen nachgewiesen werden. Zukünftige Arbeiten umfassen u.a. die Herstellung spezifischer Fotolackstrukturen sowie eine Steigerung der Variabilität hinsichtlich Fotolack- und Substratwahl.

#### 5 Danksagung

Wir bedanken uns für die Förderung dieser Forschungsarbeit durch die AIM Micro Systems GmbH, die Carl Zeiss Spectroscopy GmbH, das Förderprogramm für Forschung an der Ernst-Abbe-Hochschule Jena und das Bundesministerium für Bildung und Forschung (13FH026PX6).

#### Literatur

- [1] F. Träger, Springer Handbook of Lasers and Optics (Springer 2012), Chap. 8.2.
- [2] N. Rioux, R. Tremblay, and P.-A. Belanger, "Linear, annular, and radial focusing with axicons and applications to laser machining," Appl. Opt. 17, 1532–1536 (1978).
- [3] F.M. Dickey, Laser Beam Shaping: Theory and Techniques (CRC Press 2014), Chap. 11: Axicon Ring Generation Systems
- [4] E. Förster, P. Bohnert, M. Kraus, R. Kilper, U. Müller, M. Buchmann, and R. Brunner, "Variable diameter CO2 laser ring-cutting system adapted to a zoom microscope for applications on polymer tapes," Appl. Opt. 55, 9370-9377 (2016)
- [5] C. Koch, T. J. Rinke, Fotolithografie, Grundlagen der Mikrostrukturierung, 2nd ed. (MicroChemicals 2020)