

**Arbeitsgebiet:** Mikro- und Nanofertigung (Mikro-Nano-Integration)

**Anwendungsbereich:** 2,5,12,13

**Präsentation bevorzugt**

## Herstellung mikrooptischer Komponenten durch Zwei-Photonen-Polymerisation

P.-I. Dietrich<sup>1,2</sup>, S. F. Wondimu<sup>1</sup>, T. Wienhold<sup>1</sup>, M. Steidle<sup>1</sup>, A. Hofmann<sup>3</sup>, N. Lindenmann<sup>1,2</sup>,  
M. R. Billah<sup>1,2</sup>, T. Hoose<sup>1,2</sup>, M. Blaicher<sup>1,2</sup>, W. Freude<sup>2</sup> und C. Koos<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Institut für Mikrostrukturtechnik, (IMT), Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe

<sup>2</sup>Institut für Photonik und Quantenelektronik (IPQ), Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe

<sup>3</sup>Institut für Angewandte Informatik (IAI), Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe

[p-i.dietrich@kit.edu](mailto:p-i.dietrich@kit.edu), [christian.koos@kit.edu](mailto:christian.koos@kit.edu)

Viele mikrooptische Anwendungen erfordern die Herstellung genau positionierter Freiformstrukturen. Bestehende Technologien zur Herstellung von Linsen umfassen zum Beispiel die Verwendung von Tropfen auf Oberflächen mit geeigneten Benetzungseigenschaften [1]. Diese Ansätze sind jedoch bezüglich der Tropfenform und -größe eingeschränkt und dadurch wenig flexibel. Für die Herstellung von komplexeren Formen wie Phasenplatten kann Graustufenlithographie verwendet werden, jedoch ist der technische Aufwand hoch und die Präzision beschränkt [2]. Eine weitere Herausforderung stellt die Positionierung der Komponenten relativ zu bereits vorhandenen optischen Strukturen dar [3]. Um die genannten Herstellungs- und Positionierprobleme zu umgehen, verwenden wir dreidimensionale (3D) Zwei-Photonen-Polymerisation (Englisch: two-photon polymerization, TPP) zum Aufbau optischer Sub-Mikrometer-Strukturen [4]. Im Folgenden zeigen wir Beispiele für strahlformende Mikro-Optiken, die durch Zweiphotonenpolymerisation hergestellt werden. Diese Bauteile lassen sich in situ mit nahezu beliebigen dreidimensionalen Formen herstellen und dabei mit hoher Präzision an bereits vorhandenen Strukturen ausrichten.

Als Beispiel verwenden wir mikro-optische System zum optischen Pumpen von Mikrokelch-Lasern [5]. Diese Bauteile weisen großes Anwendungspotential in der Biosensorik zur hochsensitiven und parallelisierten Detektion von Marker-Molekülen auf [6]. Für eine effiziente Anregung der Resonatormoden muss das Intensitätsprofil des Pumpstrahls an die Ringform der Resonatormoden angepasst werden. Ringförmige Intensitätsprofile werden beispielsweise durch schraubenförmige Phasenplatten (Englisch: spiral phase plate, SPP) erzeugt [7], siehe Abb. 1. Bei einer solchen SPP ändert sich die Phase bei einem Umlauf in azimuthaler Richtung (senkrecht zur Wellenausbreitungsrichtung  $z$ ) um  $n \times 2\pi$ , wobei  $n$  eine ganze Zahl ist. Alternativ können zur Erzeugung von ringförmigen Strahlprofilen auch Axicons verwendet [8], deren konische Oberfläche einen Lichtstrahl mit ebener Phasenfront zu einem Strahl mit ringförmigen Intensitätsprofil wandelt, siehe Abb. 2(a). Im Rahmen unserer Arbeiten konnten sowohl SPP als auch Axicons demonstriert werden, die zur Strahlformung von Pumplicht für Laser-Kelchresonatoren geeignet sind.

Die SPP wurde mit einer wellenoptischen Simulation für eine Betriebswellenlänge vom 523,5 nm ausgelegt (Zemax [9]). Der Durchmesser der Phasenplatte beträgt 100  $\mu\text{m}$ , ihre Brechzahl liegt bei 1,52. Der resultierende Phasenhub senkrecht zur Strahlbreitungsrichtung ( $z$ -Achse) beträgt  $22 \times 2\pi$  pro Umlauf um die  $z$ -Achse. Das entspricht einer Steigung von 22,15  $\mu\text{m}$  pro Umlauf. Die SPP ist dimensioniert für das optimale Einkoppeln in Kelchresonatoren mit einem Durchmesser von 40  $\mu\text{m}$ . Der simulierte Abstand von 100  $\mu\text{m}$  der SPP vom Kelchresonator wird durch 130  $\mu\text{m}$  hohe Säulen eingestellt, siehe Abb. 1 (a). Bei Durchleuchtung der SPP mit einem Laser entsteht ein ringförmiges Strahlprofil, siehe Abb. 1(b).

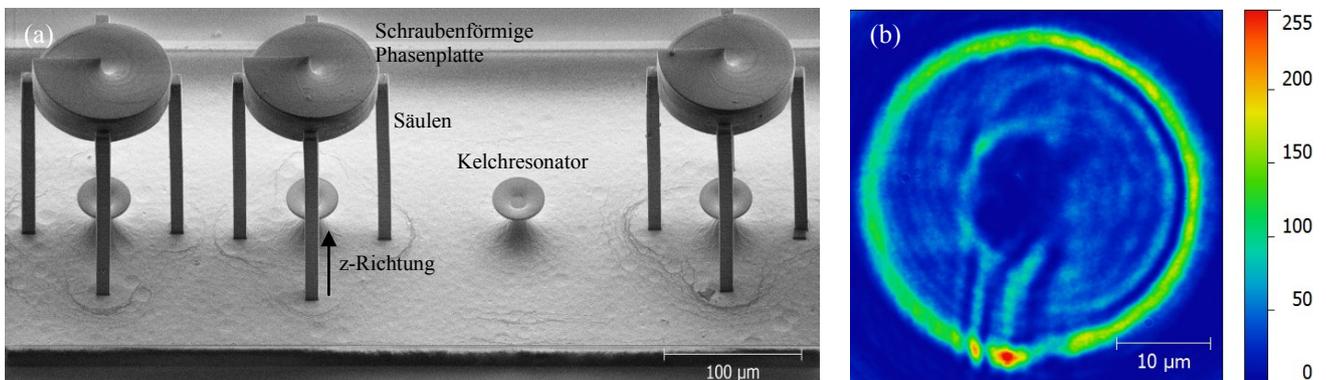
Das säulengestützte Axicon, Abb. 2(a), wurde zusammen mit einer mikro-optischen Plankonvex-Linse mit Hilfe des Zemax-Raytracing-Moduls entworfen. Der Strahlverlauf sowie geometrische Parameter der Mikrooptiken sind in Abb. 2(b) gezeigt. Abbildung 2(c) zeigt die Aufsicht auf das optische System, das von unten mit einem parallelen Strahlenbündel beleuchtet wird. Der helle Ring mit hoher Lichtintensität wird in der Fokusebene von Abb. 2(c) beobachtet und illustriert die Qualität der optischen Elemente.

Diese beiden Beispiele demonstrieren die Tauglichkeit von Zweiphotonen-Polymerisation zur hochpräzisen in-situ Fabrikation von mikro-optischen Freiformelementen auf Chip- oder Waferebene.

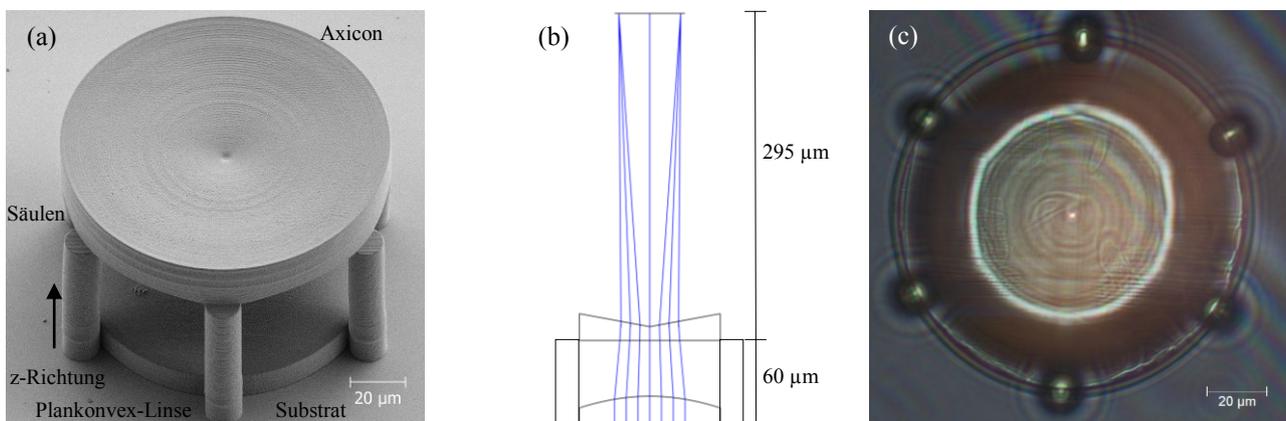
Diese Arbeit wurde unterstützt vom European Research Council (ERC Starting Grant 'EnTeraPIC', Nummer 280145), von der Alfred Krupp von Bohlen und Halbach Stiftung, der Helmholtz International Research School for Teratronics (HIRST) und der Karlsruhe Nano-Micro Facility (KNMF).

## Literatur

- [1] P. Li, J. Pei, L. Pan, H. Zappe; *Fabrication method of low f-number microlens arrays by using surface coating and epoxy dispensing technology*; J. Micro/Nanolith. MEMS MOEMS; vol. 13; pp. 023004, 2014;
- [2] T. Watanabe, M. Fujii, Y. Watanabe, N. Toyama, Y. Iketaki; *Generation of a doughnut-shaped beam using a spiral phase plate*; Rev. Sc. Instrum.; vol. 75; pp. 5131-5135, 2004;
- [3] B. Pezeshki, J. Heanue, D. Ton, T. Schrans, S. Rangarajan, S. Zou, G.W. Yoffe, A. Liu, M. Sherback, J. Kubicky, P. Ludwig; *High performance MEMS-based micro-optic assembly for multi-lane transceivers*; Lightw. Technol.; vol. 32; pp. 2796-2799, 2014;
- [4] S. Maruo, O. Nakamura, S. Kawata; *Three dimensional microfabrication with two-photon-absorbed photopolymerization*; Opt. Lett.; vol. 22; pp. 132-134, 1997;
- [5] T. Grossmann, S. Schleede, M. Hauser, M. B. Christiansen, C. Vannahme, C. Eschenbaum, S. Klinkhammer, T. Beck, J. Fuchs, G. U. Nienhaus, U. Lemmer, A. Kristensen, T. Mappes, and H. Kalt; *Low-threshold conical microcavity dye lasers*; Appl. Phys. Lett.; vol. 97; pp. 063304, 2010;
- [6] U. Bog, T. Laue, T. Grossmann, T. Beck, T. Wienhold, B. Richter, M. Hirtz, H. Fuchs, H. Kalt, and T. Mappes; *On-chip microlasers for biomolecular detection via highly localized deposition of a multifunctional phospholipid ink*; Lab on a Chip; vol. 14; pp. 2701-2707, 2013;
- [7] E. Brasselet, M. Malinauskas, A. Žukauskas, S. Juodkakis; *Photopolymerized microscopic vortex beam generators: Precise delivery of optical orbital angular momentum*; Appl. Phys. Lett.; vol. 97; pp. 211108, 2010;
- [8] P. Bélanger, M. Rioux; *Ring pattern of a lens-axicon doublet illuminated by a Gaussian beam*; Appl. Opt.; vol. 17, pp. 1080-1088, 1978;
- [9] Zemax; <http://www.zemax.com>.



**Abb. 1: Phasenplatten zur Erzeugung eines ringförmigen Intensitätsprofils, das sich zum optischen Pumpen von Mikrokelch-Lasern eignet.** Die optische Dicke der Phasenplatten verändert sich bei einem Umlauf in azimuthaler Richtung (senkrecht zur Wellenausbreitungsrichtung  $z$ ) um ein ganzzahliges Vielfaches der Wellenlänge. Dadurch verursachen sie eine schraubenförmige Phasenfront, die sich durch eine ringförmige Intensitätsverteilung bemerkbar macht. (a) Rasterelektronenmikroskopaufnahme von Phasenplatten, die mit Hilfe von Säulen in  $100\ \mu\text{m}$  Höhe über Mikrokelch-Resonatoren positioniert sind. (b) Intensitätsverteilung des von einer Phasenplatte (Durchmesser  $50\ \mu\text{m}$ , Stufenhöhe  $2\ \mu\text{m}$ ) generierte Strahlprofils bei Anregung mit einem Laser der Wellenlänge  $532\ \text{nm}$ .



**Abb.2 Konkaves Axicon auf Säulen oberhalb einer Plankonvex-Linse.** Bei rückseitiger Beleuchtung durch das transparente Substrat ergibt sich ein ringförmiges Strahlprofil. Durch die Kombination aus Axicon und Linse können Parameter wie Größe und Abstand des Ringprofils eingestellt werden. (a) Elektronenmikroskop-Aufnahme der Axicon-Linsen-Optik. (b) Strahlengang der Axicon-Linsen Kombination bei Beleuchtung durch das Substrat hindurch. (c) Betrachtung der Axicon-Linsen Optik in der Ebene mit höchsten Kontrast des ringförmigen Strahlprofils. Dazu wurde die Axicon-Linsen-Optik durch das Substrat hindurch mit einer ebenen Wellenfront beleuchtet.