

# Anwendungen ortsvarianter Polarisationsverteilungen bei der Mikromaterialbearbeitung mit ultrakurzen Laserpulsen

Ulrich Klug\*, Jan Düsing\*, Sebastian Baum\*, Rainer Kling\*

\*Laser Zentrum Hannover e.V., Hollerithallee 8, 30419 Hannover

[mailto: u.klug@lzh.de](mailto:u.klug@lzh.de)

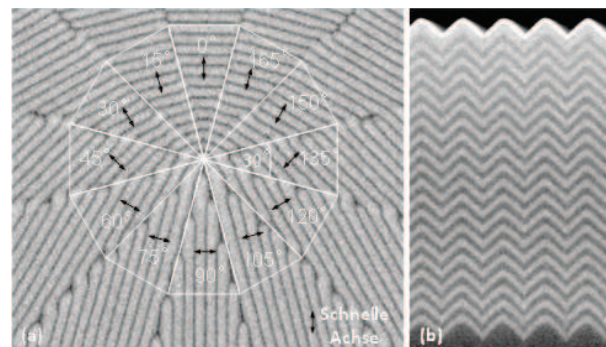
Diese Arbeit präsentiert Ergebnisse eigener experimenteller Arbeiten zu Abtragsversuchen mit polarisationskonvertierten ultrakurzen Laserpulsen und bewertet deren Nutzen für die Mikromaterialbearbeitung.

## 1 Einführung

Typischerweise werden in der Mikromaterialbearbeitung gepulste Laserquellen eingesetzt, bei denen ohne Aufbereitung des Polarisationszustandes in der Regel lineare bzw. elliptische Polarisation vorliegt. In vielen Fällen der abtragenden Verfahren kann dabei der Einfluss der Haupt-Polarisationsrichtung auf das Abtragsergebnis und die Prozessgeschwindigkeit beobachtet werden, sodass die Polarisationsrichtung des verwendeten Laserstrahls durch geeignete Maßnahmen "homogenisiert" werden muss. In der Literatur werden dazu neben dem Einsatz von Viertelwellenplatten zur Erzeugung rein zirkular polarisierten Lichtes auch rotierende Halbwellenplatten zur Polarisationsmodulation empfohlen [1]. Im Gegensatz zu diesem zeitvarianten Ansatz kann der Polarisationszustand auch gezielt über den Querschnitt des Laserstrahls verändert werden. Dieser zunächst exotisch wirkende Ansatz wird in der Literatur schon früh insbesondere für die zwei rotations-symmetrischen Spezialfälle der radialen und azimuthalen Polarisation diskutiert [2]. Die heutzutage erhältlichen optischen Komponenten zur Erzeugung azimuthal bzw. radial polarisierten Lichtes wecken zunehmend Interesse in der Mikromaterialbearbeitung. Diese Arbeit untersucht und bewertet den Einsatz eines kommerziell erhältlichen Polarisationskonverters.

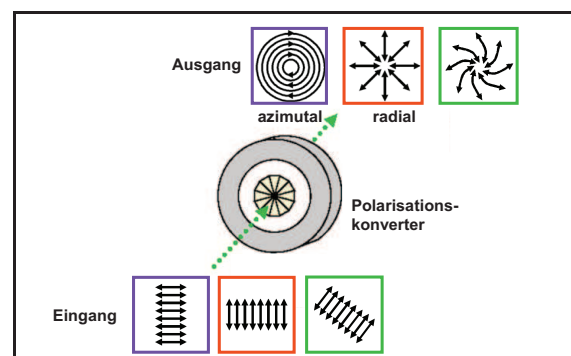
## 2 Polarisationskonverter

Der verwendete Polarisationskonverter (PK) des Herstellers Photonic Lattice ist ein transmissives Kreisscheibenelement bestehend aus zwölf gleichschenkligen Dreiecksegmenten von Halbwellenplatten, bei der jedes Segment mit seiner schnellen Achse um den halben Azimutwinkel verdreht angeordnet ist (vgl. Abb. 2). Die erforderliche Doppelbrechung beruht auf dem periodisch wechselnden Schichtaufbau des Substratmaterials, wobei nur sehr geringe optische Verluste von etwa 0.8 Prozent hingenommen werden müssen [3].



**Abb. 1** REM-Aufnahmen der segmentierten Halbwellenplatte a) auf die Oberfläche im Zentrum b) im Querschnitt auf die periodische Schichtstruktur eines Segments.

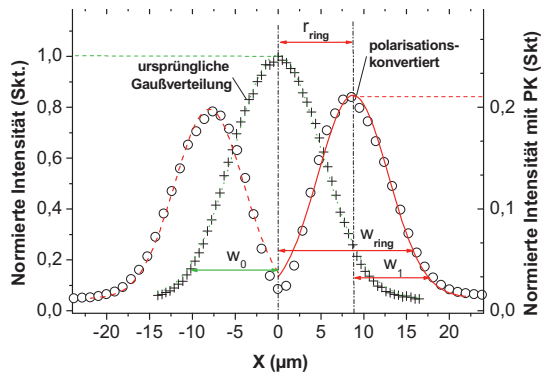
Bei vertikaler Ausrichtung des einfallenden, linear polarisierten Lichtes entsteht radial polarisiertes Licht, bei horizontaler Ausrichtung entsteht azimuthal polarisiertes Licht. Bei Ausrichtungen zwischen diesen Hauptrichtungen entsteht am Ausgang des PK eine spiralförmige Anordnung der Polarisation (vgl. Abb. 2).



**Abb. 2** Funktionsprinzip des Polarisationskonverters

In allen Fällen stellt sich durch die Überlagerung der rotations-symmetrisch verteilten linearen Polarisationsrichtungen ein ringförmiges Intensitätsprofil ein, wobei die Intensität im Strahlzentrum verschwindet und die Spitzenintensität am Mittenradius des Rings  $r_{\text{ring}}$  etwa ein Fünftel der ursprüngli-

chen Spitzenintensität beträgt (vgl. Abb. 3). Die Intensitätsverteilung im Schnitt des Ringes indes ist mit einem gaußförmig angepassten Strahlradius  $w_1$  etwa 20 Prozent kleiner als  $w_0$ .



**Abb. 3** Intensitätsverteilung im Fokus des ursprünglichen und des polarisationskonvertierten Laserstrahls eines ps-Lasers (10 ps),  $\lambda=532$  nm.

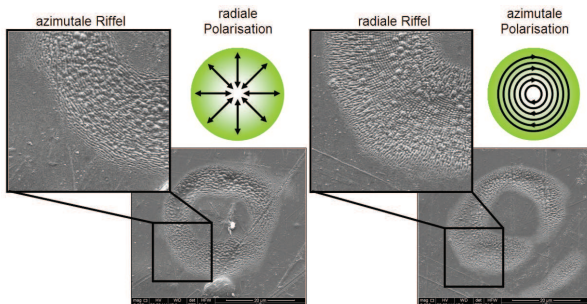
In unserem Versuchsaufbau bestehend aus Piko- bzw. Femtosekundenlaser (fs-/ps), Strahlauweitung und Galvanometerscanner mit f-Theta Fokussiereinheit (f=100mm) verschiebt sich die Fokussposition um ca. 200  $\mu\text{m}$  entlang der opt. Achse.

ps-Laser	Fokusslage	Strahltaile (86%)	Ringradius
Ohne PK	Z=0 $\mu\text{m}$	$w_0 = 10.26 \mu\text{m}$	-
mit PK	Z=+ 217 $\mu\text{m}$	$w_1 = 8.08 \mu\text{m}$ $w_{\text{ring}} = 15.65 \mu\text{m}$	$r_{\text{ring}} = 8.05 \mu\text{m}$

**Tab. 1** Ergebnisse einer Strahltaillencharakterisierung

### 3 Erzeugung von Wellenstrukturen

Von ultrakurzen Laserpulsen ist bekannt, dass sich bei Ablation mit Pulszügen nahe der Abtragschwelle periodische Wellenstrukturen senkrecht zur Polarisationsrichtung an der Materialoberfläche ausformen. Bei Verwendung des PK bilden sich entsprechend der anliegenden Polarisation azimutale bzw. radiale Wellenstrukturen in den Bereichen der ringförmigen Intensitätsverteilung. Die in Abb. 4 gezeigten Strukturen sind bereits mit bloßem Auge sichtbar, da sie gitterartig weißes Licht

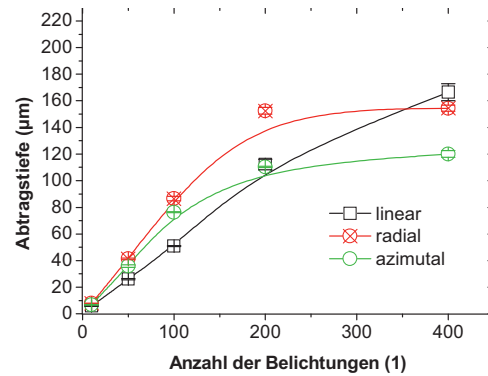


**Abb. 4** REM-Aufnahmen von azimutalen und radialen Wellenstrukturen erzeugt mit einem fs-Laser (500 fs),  $\lambda=343$  nm (THG) auf Polyimid.

spektral zerlegen und daher wie ein Hologramm erscheinen. Da die Wellenstrukturen radial bzw. azimutal angeordnet sind, wirkt der Beugungseffekt bereits bei einem einzelnen Abtragspunkt in alle Richtungen und kann dementsprechend als omnidirektionales Gitterpixel bezeichnet werden.

### 4 Materialabtrag von Metall

Bei Abtragsversuchen zur Aushebung von Mikrokavitäten in Metall zeigt sich, dass durch den Einsatz von Radialpolarisation zwar die maximal erzielbare Strukturtiefe abnimmt, dass jedoch bis zum Erreichen der Maximaltiefe die Abtragsgeschwindigkeit um bis zu 50 Prozent erhöht werden kann [4].



**Abb. 5** Erzielte Abtragtiefe in Cr6-Stahl für linear, radial und azimutal polarisierte ps-Laserstrahlung.

Die erzielte Steigerung der Abtragsgeschwindigkeit ist von großem Vorteil für die Texturierung von Bauteilen, bei denen ein großes Gesamtvolumen durch eine Vielzahl von einfachen, flachen Kavitäten oder flachen Strukturen komplexer lateraler Geometrie ausgehoben werden muss.

### 5 Danksagung

Wir bedanken uns bei Laser 2000 und Amplitude Systemes für die Bereitstellung des THG-Moduls für den fs-Laser, sowie bei Fa. Photonic Lattice, Japan, für die Bereitstellung des UV-Polarisationskonverters.

### Literatur

- [1] S. Nolte, C. Momma, G. Kamlage, „Polarization effects in ultrashort-pulse laser drilling” in: Appl. Phys. A **68**, 563–567 (1999)
- [2] M. Born, E. Wolf, *Principles of Optics*, (Pergamon, Oxford 1969; Nauka, Moskau 1973)
- [3] T. Sato, K. Miura et al., „Photonic crystal for the visible range fabricated by autocloning technique and their application” in: Opt. Quant. Electron. **34**, 63-70 (2002)
- [4] U. Klug, J. Düsing et al., „Polarization converted laser beams for micromachining applications” in: Proc. of the SPIE, **7590**, 759006-759006-8 (2010)