

Herstellung von Mikrostrukturen zur Beeinflussung des Bahndrehimpulses elektromagnetischer Strahlung

Sebastian Büttner, Michael Pfeifer, Steffen Weißmantel
Lasereinstitut Hochschule Mittweida, Technikumplatz 17, 09648 Mittweida

Am Lasereinstitut Hochschule Mittweida wird seit mehreren Jahren zur laserbasierten Herstellung mikrooptischer Bauelemente geforscht. Mit dem verwendeten Maskenprojektionsverfahren können, je nach Maskenform und Bewegungsregime, unterschiedliche optisch wirksame Strukturen erzeugt werden. Durch die Entwicklung zweier neuer Verfahrensvarianten der Fluorlaser-Mikrostrukturierung wird die Herstellung von sogenannten Mikro-Spiralphasenplatten und Fork-Gittern ermöglicht. Die Verfahrensvarianten sind dabei sehr flexibel bezüglich der realisierbaren Strukturgeometrie. Mit einem Satz Masken können Spiralphasenplatten mit unterschiedlichen Konfigurationen hergestellt werden. Für die Erzeugung von Fork-Gittern, dem beugungsoptischen Pendant der Spiralphasenplatten, müssen spezielle Kalziumfluorid-Masken angefertigt werden, was ebenfalls mittels Fluorlaser-Mikrostrukturierung erfolgt.

1. Einleitung

Die Charakterisierung elektromagnetischer Strahlung erfolgt in bekannter Weise über deren Welleneigenschaften und den damit verbundenen Größen Wellenlänge, Amplitude, Phase und Polarisierung. Im Bereich der optischen Datenübertragung werden Signale derart beeinflusst, dass sie sich in mindestens einer dieser Eigenschaften unterscheiden. Dadurch ist eine gleichzeitige Übertragung mehrerer Signale möglich (Multiplexing). Die Kapazität der Übertragungskanäle ist jedoch nicht unendlich. Aufgrund nichtlinearer Effekte ist die Intensität innerhalb des Übertragungsmediums (z.B. Glasfaser) und damit auch die Anzahl gleichzeitig übertragbarer Signale limitiert. Die herkömmlichen Multiplexing-Methoden, welche auf der Variation der Wellenlänge und Polarisierung beruhen, sind bereits so weit entwickelt, dass die Kapazitätsgrenze erreicht wird [1]. Neue Möglichkeiten bietet hier die Modulation des Bahndrehimpulses elektromagnetischer Strahlung, welcher für das Multiplexing (orbital-angular-momentum (OAM)-Multiplexing) genutzt werden kann [2,3]. Doch nicht nur für die optische Datenübertragung ist der Bahndrehimpuls eine nützliche Eigenschaft. Derartig manipulierte Strahlung kann beispielsweise in optischen Pinzetten zur Fixierung und insbesondere zur Rotation mikroskopischer Partikel eingesetzt werden [4]. Darüber hinaus ermöglichen quantenoptische Methoden die Verschränkung von Bahndrehimpulszuständen einzelner Photonen. Diese Zustände können beispielsweise für die Quantenkryptografie und Quantenteleportation genutzt werden [5].

Im Allgemeinen erfolgt die Modulation durch Spiralphasenplatten (SPPs) und Fork-Gitter (FGs), welche durch ihre spezielle Geometrie die Phase und damit auch den Bahndrehimpuls in ganz bestimmter Weise beeinflussen. Am Lasereinstitut Hochschule Mittweida wurden nun zwei neue Methoden zur Herstellung derartiger optischer Elemente entwickelt. Neben binären und Blaze-Gittern, diffraktiven Phasenelementen sowie refraktiven

und diffraktiven Linsen, können nun auch derartige optische Elemente in mikrooptischer Ausführung hergestellt werden [8-11]. Die Herstellung erfolgt mittels Fluorlaser-Mikrostrukturierung, welche für die genannten Elemente weiterentwickelt wurde.

2. Experimenteller Aufbau

Die Fluorlaser-Mikrostrukturierung basiert auf dem Maskenprojektionsverfahren. Die zumeist als Blende ausgeführte Maske wird in den homogenisierten Laserstrahl eingebracht und über ein Objektiv auf dem Werkstück abgebildet und so Material entsprechend der Maskeengeometrie abgetragen. Mit dieser Technik können Strukturen auf drei unterschiedlichen Wegen erzeugt werden: Durch einen schichtweisen Abtrag und die Änderung des überfahrenen Bereichs (slicing), durch die Änderung der Maskeengeometrie von Puls zu Puls oder durch den Einsatz speziell geformter Masken in Kombination mit einer Relativbewegung von Abtragsbereich und Werkstück. Insbesondere die letzten beiden Methoden wurden in verschiedensten Varianten zur Herstellung mikrooptischer Elemente genutzt. Die Erzeugung von SPPs stellt eine neue Herausforderung dar, da dabei die Strukturierungstiefe azimuthal gesteuert werden muss um die gewünschte helikale Struktur herzustellen.

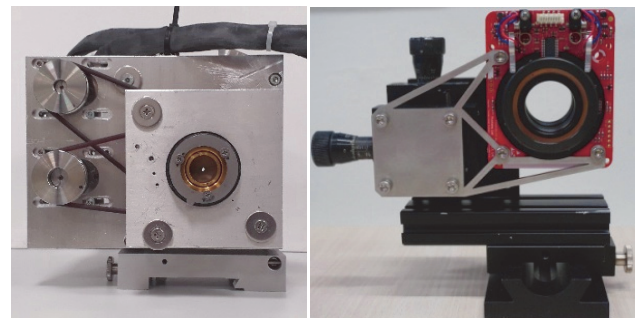


Abb. 1: Schrittmotorgetriebene Doppelrotationsachse (l.) und Piezomotorgetriebene Rotationsachsen (r.).

Realisiert wird dies durch zwei hintereinander in den Laserstrahl eingebrachte, mittels Rotationsachsen (s.

Abb. 1) drehbare Halbkreismasken, welche unabhängig voneinander gesteuert werden können. Die Überlagerung der Masken führt zu einer resultierenden Maskengeometrie in Form eines Kreissektors. Der Öffnungswinkel des Kreissektors hängt von der relativen Verdrehung der Masken zueinander ab. Die Strukturierung beginnt mit der vollständigen oder partiellen Überlagerung der Masken. Nach jedem Abtrag wird der Winkel des sich ergebenden Kreissektors durch das Verdrehen einer Maske um einen entsprechenden Stufenwinkel verringert. Damit verringert sich der Abtragsbereich in azimuthaler Richtung. Mehrfach bestrahlte Bereiche werden tiefer strukturiert, wodurch eine helikale Struktur entsteht. Je nachdem, welche der beiden Masken während des Prozesses verdreht wird, können links- oder rechts- händige SPPs erzeugt werden. Des Weiteren können die Anzahl der 2π -Phasensprünge (sog. topologische Ladung), die Anzahl der Stufen und die Modulationstiefe variiert werden.

Im Gegensatz zu den SPPs erfolgt die Herstellung der FGs ohne Masken- oder Substratbewegung. Der helikale Phasenterm, welcher für die Modulation des Bahndrehimpulses entscheidend ist, wird hierbei mit einem Phasengitter überlagert. Dadurch ergibt sich eine unregelmäßige Gitterstruktur. Das Layout des berechneten Gitters wird mittels Fluorlaser in ein Kalziumfluorid-Substrat übertragen. Das Substrat mit der eingebrachten Struktur wird im Anschluss selbst als Maske eingesetzt.

3. Ergebnisse

Die Herstellung der SPPs erfolgte in dem beschriebenen Regime und mit Variation verschiedener Parameter. Es wurden SPPs mit unterschiedlicher topologischer Ladung l , Stufenzahlen N_i und Modulationstiefen m hergestellt ($l = \pm 2, 3, 4, 5, 6$ / $N_i = 8, 16, 32$ / $m = 1, 2, 4$). Aus den jeweiligen Parametern ergeben sich unterschiedliche Eigenschaften der SPPs. Die erreichbare Bearbeitungsqualität hängt zum Teil direkt mit den Eigenschaften der SPPs zusammen.

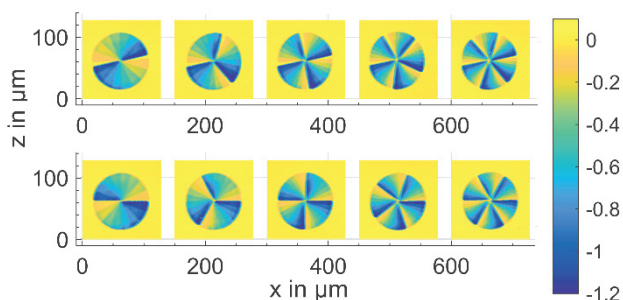


Abb. 2: Konfokalmikroskopische Aufnahmen in Quarzglas hergestellter links- (o.) und rechts- (u.) händiger SPPs $l = \pm 2, 3, 4, 5, 6$ (v.l.n.r.).

Wie in Abb. 2 und Abb. 3 zu erkennen ist, entstehen beim Einsatz zweier halbkreisförmiger Masken Sektoren mit geraden Sektoren- und Stufenkanten. Die Halbkreismasken können derart verändert werden, dass die Sektoren und Stufenkanten eine Krümmung aufweisen. Die entstehenden Stufen sind demnach verzerrt, was in radialer

Richtung betrachtet einer Krümmung der Oberfläche entspricht. Damit ist die Herstellung von SPPs mit helikalen und sphärischen Phasentermen möglich. Der Radius des sphärischen Anteils ist mit dieser Methode jedoch nicht unabhängig vom helikalen Anteil steuerbar. Dafür muss die Strukturierung in zwei Prozesse unterteilt und das Maskendesign entsprechend angepasst werden.

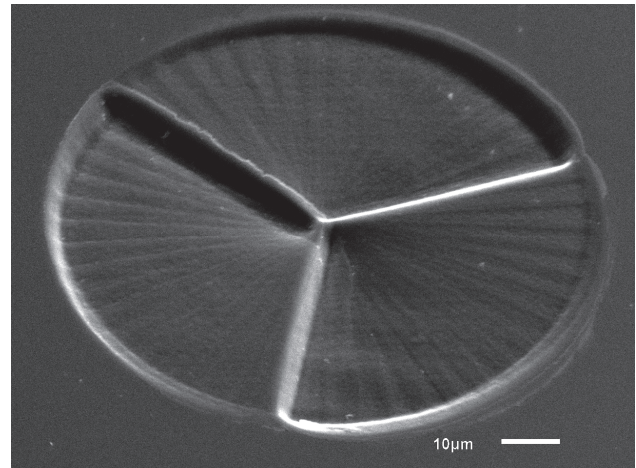


Abb. 3: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen einer in Quarzglas hergestellten links- händigen SPP ($l = 3, N_i = 16$).

Die Strukturierung der FGs gestaltet sich bezüglich der Prozessführung deutlich einfacher, da die Masken (siehe Abb. 4 (l.)) statisch in den Strahlengang eingebracht werden. Ein Übertrag der Struktur erfolgt im Anschluss mit entsprechender Fluenz und Pulszahl (vgl. Abb. 4 (r.)).

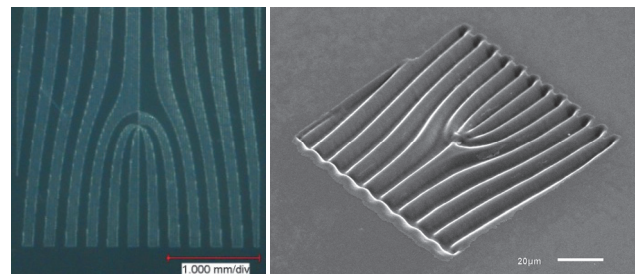


Abb. 4: Mikroskopische Aufnahme einer CaF_2 -Maske (l.) und das damit in Quarzglas hergestellte FG (r.).

Um lediglich die strukturgebenden Bereiche der Maske abzubilden, wurde zusätzlich eine quadratische Tantal-Blende verwendet. Es zeigt sich, dass eine maximale Strukturierungstiefe von ca. $5 \mu\text{m}$ erreicht werden kann. Mit zunehmender Strukturierungstiefe nehmen die Strukturen außerdem die Form eines Sinusgitters an. Dies weist darauf hin, dass die CaF_2 -Masken nicht wie die üblichen Tantal-Masken wirken. Jedoch können mit dieser Technik unabhängig vom Masken-Layout Strukturen mit sehr hoher Geschwindigkeit hergestellt werden, da die Strukturierungsdauer nur von der Pulszahl abhängt.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Die Herstellung von SPPs kann durch den Einsatz zweier Rotationsmasken erfolgen. Je nach Ausführung der Maskengeometrie und Art der Ansteuerung können SPPs mit unterschiedlicher topologischer Ladung, Stufenzahl und

Drehsinn hergestellt werden. Durch speziell ausgeformte Masken ist eine Überlagerung von helikalem und sphärischem Phasenterm möglich.

Für die Herstellung von FGs wurde eine andere Methode entwickelt. Ausgehend von der Berechnung des zu erzeugenden Gitters, erfolgt die Berechnung und die Fertigung der Maske durch Strukturierung eines CaF_2 -Substrates. Die Substrate werden im Anschluss als Maske eingesetzt. Mit der Methode wurden unterschiedliche FGs hergestellt. Die Strukturtiefe ist mit ca. 5 μm begrenzt und die Gitterform nähert sich mit zunehmender Tiefe einem Sinus-Gitter an.

Die Maskenprojektion bietet eine große Vielfalt an Möglichkeiten zur Prozessgestaltung. Die vorgestellten Methoden erweitern das Portfolio der mit dem Fluorlaser herstellbaren Strukturtypen um weitere zwei. Nachteilig erweist sich lediglich, dass für die zu erzeugende Struktur die entsprechenden Maskengeometrien hergestellt und deren Bewegungen realisiert werden müssen. Der Einsatz eines Mikrospiegelarrays welches als ansteuerbare Maske dienen könnte, würde diesbezüglich Abhilfe schaffen. Dies würde die Flexibilität und Qualität des Verfahrens noch einmal enorm steigern und den Prozess industrietauglich machen.

Literaturverzeichnis

- [1] Richardson, D. J. (2010). Filling the Light Pipe. In: *Science*, 330 (6002), S. 327-328.
- [2] Xie, Z.; Gao, S.; Lei, T.; Feng, S.; Zhang, Y.; Li, F.; Zhang, J.; Li, Z.; Yuan, X. (2018). Integrated (de)multiplexer for orbital angular momentum fiber communication. In: *Photonics Research*, 6(7), S. 743-749.
- [3] Bozinovic, N.; Yue, Y.; Ren, Y.; Tur, M.; Kristensen, P.; Huang, H.; Willner, A.E.; Ramachandran, S. (2013). Terrabit-Scale Orbital Angular Momentum Mode Division Multiplexing in Fibers. In: *Science*, 340(6140), S. 1545-1548.
- [4] Yao, A.M.; Padgett, M.J. (2011). Orbital Angular Momentum: origins, behaviour and applications. In: *Advances in Optics and Photonics*, 3, S. 161-204.
- [5] Mair A.; Vaziri, A.; Weihs, G.; Zeilinger, A. (2001). Entanglement of the orbital angular momentum states of photons. In: *Nature*, 412, S. 313-316.
- [6] Allen, L.; Beijersbergen, M.W.; Spreeuw, R.J.C.; Woerdman, J.P. (1992). Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes. In: *Physical Review A*, 45(11), S. 8185-8189.
- [7] Allen, L.; Padgett, M. (2011). The Orbital angular momentum of light. In *Twisted Photons*, WILEY-VCH Verlag GmbH, S. 1-12, Weinheim.
- [8] Büttner, S.; Pfeifer, M.; Weissmantel, S. (2019). Manufacturing of Cylindrical Micro Lenses and Micro Lens Arrays in Fused Silica and Borosilicate Glass using F_2 -Laser Microstructuring. In: *Proceedings of 7th International Conference on Photonics, Optics and Laser Technology*, S. 66-72.
- [9] Pfeifer, M.; Büttner, S.; Zhang, R.; Serbay, M.; Weißmantel, S. (2017). F_2 -Lasermikrostrukturierung von Mikro-Fresnel-Linsen, In: *Scientific Reports*, 10. *Mittweidaer Lasertagung*, (2), S. 127-130.
- [10] Pfeifer, M.; Jahn, F.; Kratsch, A.; Steiger, B.; Weissmantel, S. 2014. F_2 -Laser Microfabrication of Diffractive Optical Elements. In: *Proceedings of 2nd International Conference on Photonics, Optics and Laser Technology*, S. 91-96.
- [11] Pfeifer, M.; Weissmantel, S.; Reisse, G. 2013. Direct laser fabrication of blaze gratings in fused silica. In: *Applied Physics A*, 112(1), S. 61-64.