

Effiziente, flexible und präzise Multistrahlbearbeitung durch Verwendung akustooptischer Modulatoren in Kombination mit Prismen-Arrays

Mario Hesker*, Annika Bonhoff*, Carlo Holly* **

*Lehrstuhl für Technologie Optischer Systeme, RWTH Aachen University

**Fraunhofer-Institut für Lasertechnik, Aachen

mario.hesker@tos.rwth-aachen.de

Vorgestellt wird ein skalierbares optisches System zur Multistrahlbearbeitung mit ultrakurzgepulster Laserstrahlung mit insgesamt 64 unabhängig schaltbaren Teilstrahlen unter Verwendung von acht akustooptischen Modulatoren (AOM). Eine kompakte Strahlführung, die Maximierung der Beugungseffizienz sowie flexibel einstellbare Teilstrahlabstände werden durch Prismenarrays ermöglicht.

1 Motivation

Die effektive Ausnutzung von Hochleistungs-Ultrakurzimpulslaserstrahlung (1 kW, < 10 ps) in der Oberflächenmikrostrukturierung wird durch materialspezifische Maximalintensitäten limitiert [1]. Ein etablierter Ansatz zur Erhaltung der Bearbeitungsqualität bei gleichzeitiger Maximierung der Abtragsrate besteht in der Aufteilung der verfügbaren Laserleistung auf ein Multistrahlararray mittels eines diffraktiven Strahlteilers (DOE). Das starre Multistrahlararray wird in der Regel mithilfe eines Galvanometerscanners auf der Werkstückoberfläche positioniert. [2]

Zur Erzeugung nichtperiodischer dreidimensionaler Oberflächenstrukturen ist eine individuelle, pulsweise Schaltung jedes Teilstrahls erforderlich. Hierfür werden üblicherweise akustooptische Modulatoren (AOM) eingesetzt. Mit derzeit verfügbaren Mehrkanal-AOMs können maximal acht Teilstrahlen mit insgesamt etwa 100 W unabhängig voneinander geschaltet werden. Zur Skalierung werden im vorgestellten Ansatz daher mehrere AOMs parallel angeordnet.

2 Stand der Technik

Die Beugungseffizienz von AOMs hängt maßgeblich vom Eintrittswinkel der Teilstrahlen (Bragg-Winkel) ab [3]. Da die aus dem Strahlteiler-DOE austretenden Teilstrahlen unterschiedliche Ausbreitungswinkel aufweisen, werden zur Parallelisierung der Teilstrahlen bislang Relay-Optiken eingesetzt [4]. Die Brennweite von Relay-Optiken führt dabei zu einer Fokussierung der Teilstrahlen, sodass die Beugungseffizienz der AOMs durch die resultierende Strahldivergenz reduziert wird.

Der erforderliche Linsendurchmesser steigt proportional zur Anzahl der AOMs sowie zu deren bauartbedingter Breite. Da sich darüber hinaus der Kanalabstand (ca. 4 mm) und die Baubreite der AOMs (ca. 55 mm) um eine Größenordnung unterscheiden, können mit Relay-Optiken keine symmetrischen Spotabstände realisiert werden. Zudem sind

die Spotabstände auf der Werkstückoberfläche üblicherweise auf Größenordnungen von etwa 10 bis 100 μm begrenzt [5].

3 Multistrahlkonzzept

Das hier vorgestellte alternative Strahlführungskonzept basiert auf der Verwendung von Trapezprismen zur unidirektionalen und afokalen Strahlumlenkung. Bei einem Multistrahlararray mit $n \times m$ Teilstrahlen werden jeweils alle n Strahlen einer Zeile m simultan so umgelenkt, dass der Abstand der dadurch parallelisierten Teilstrahlen dem Kanalabstand der akustooptischen Modulatoren (AOM) entspricht. Der Ablenkswinkel wird dabei ausschließlich von den Facettenwinkeln der Prismen bestimmt, wodurch die Justage vereinfacht wird. Zur Vereinfachung von Handhabung und Justage werden die m Prismen zudem zu einem Prismen-Array verkittet (Abb. 1).

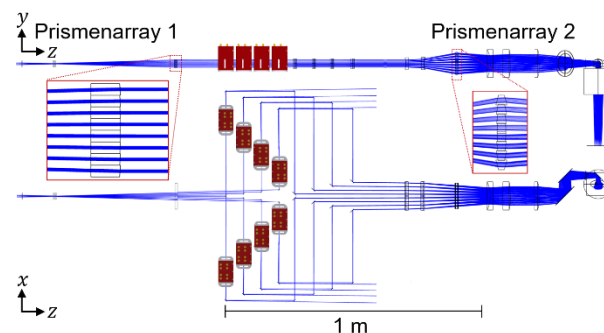


Abb. 1 Optikdesign des 8x8-Multistrahlsystems.

Orthogonal zur Umlenkrichtung des Prismen-Arrays wird pro Strahlzeile ein Umlenkspiegelpaar eingesetzt. Durch die vollständige Entkopplung beider Umlenkrichtungen kann eine freie Anordnung der AOMs auf dem optischen Tisch und dadurch insgesamt ein kompakter sowie skalierbarer Gesamtaufbau realisiert werden. Gleichzeitig bleibt die Kollimation der Teilstrahlen erhalten, wodurch eine Beugungseffizienz von 90,8 % erzielt wird. Gegenüber einem optischen System mit Relay-Optiken zur

Strahlführung entspricht dies einer Steigerung der Beugungseffizienz um etwa 11 %.

Mithilfe eines zweiten Prismen-Arrays wird in Kombination mit jeweils drei Umlenkspiegeln pro Strahlzeile eine freie Positionierung der Spots auf der Werkstückoberfläche ermöglicht. Unter Verwendung eines konventionellen DOEs zur Strahlteilung sowie einer telezentrischen f- θ -Optik zur Fokussierung ($f = 163 \text{ mm}$) wird ein äquidistanter Spotabstand von 3,9 mm erzielt (Abb. 2).

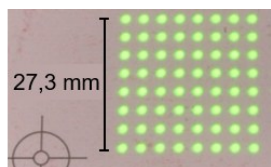


Abb. 2 Visualisierung der 8x8 Spot-Matrix mittels Detektorkarte in der Bearbeitungsebene.

Für ein Multistrahlsystem mit acht AOMs werden Prismen-Arrays mit einer maximalen Abmessung von $100 \times 100 \text{ mm}^2$ benötigt. Ein vergleichbares System auf Basis von Relay-Optiken erfordert hingegen Linsen mit einem Mindestdurchmesser von 420 mm.

Der leistungsbezogene Uniformitätsfehler des Multistrahlsystems beträgt 2,1 %, während der auf den Spotdurchmesser bezogene Uniformitätsfehler bei 3,1 % liegt. Insgesamt wird eine optische Gesamteffizienz des Multistrahlsystems von 74,2 % erreicht.

4 Thermooptische Effekte

Ergänzend werden thermooptische Effekte im ausgelegten optischen System bei einer thermischen Last von 1 kW untersucht. Hierzu wird eine gekoppelte thermooptische Simulation aus Finite-Elemente-Analyse (ANSYS) und strahlenoptische Analyse (OpticStudio) durchgeführt [6]. In einem iterativen Algorithmus werden die überlagerten thermischen Lasten auf den Oberflächen und in den Volumina der optischen Elemente berechnet. Darauf aufbauend werden die resultierenden Oberflächenverformungen sowie Brechungsindexprofile bestimmt. Die diskreten Simulationsergebnisse werden anschließend in TOP-Simulation über Polynome approximiert und in OpticStudio importiert [6].

Die thermische Last führt zu einer maximalen Spotpositionsabweichung von $1 \mu\text{m}$ in der Bearbeitungsebene sowie zu einer Verringerung des Spotdurchmessers um maximal 3,6 %. Das optische System bleibt dabei beugungsbegrenzt.

5 Herstellung der Prismen-Arrays

Zur Ausrichtung der Einzelprismen wird eine Montageschablone verwendet, in der die sukzessive verkitteten Prismen über drei Anschläge positioniert werden (s. Abb. 3, rechts).

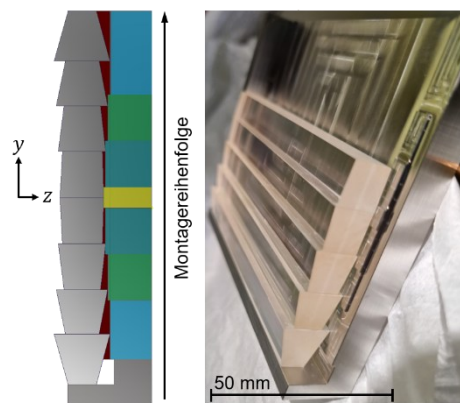


Abb. 3 Montage eines Prismen-Arrays mittels Schablone.

Alle nichtoptischen Oberflächen der Trapezprismen sind matt geschliffen, um die Haftung des UV-härtenden Klebstoffs zu verbessern und die Dicke der Klebefugen zu reduzieren.

Aufgrund der identischen Mittendicke der Prismen erfolgt die Ausrichtung in z-Richtung über entsprechend dimensionierte Absätze der Montageschablone, die in Abb. 3 (links) farblich hervorgehoben sind.

Danksagung

Das Projekt „MultiFlex“ wurde durch das Forschungs- und Innovationsprogramm Horizon 2020 der Europäischen Union unter der Fördervereinbarung Nr. 825201 gefördert.

Literaturverzeichnis

- [1] Eifel, S., Dohrn, A., Gillner, A., „Quality aspects in high power ultra short pulse laser ablation“ *Proceedings of LPM2010*, 2010.
- [2] Gafner, M., Remund, S. M., Chaja, M. W., et al., „High-rate laser processing with ultrashort laser pulses by combination of diffractive elements with synchronized galvo scanning“ *Advanced Optical Technologies*, Vol. 10, 4-5, 2021, DOI: 10.1515/aot-2021-0035.
- [3] AA Opto-Electronic, „Acousto-Optic: Acousto-Optic Theory Application Notes“, URL: <http://www.acoustooptic.com/acoustooptic-principles.html>.
- [4] Büsing, L., „Optische Systeme für die hochpräzise, scannerbasierte Multistrahlbearbeitung mit ultrakurzen Laserpulsen“, Dissertation, RWTH Aachen University, 2016.
- [5] Bruening, S., Du, K., Jarczyński, M., et al., „Ultra-fast laser micro processing by multiple laser spots“ *Procedia CIRP*, Vol. 74, 2018, DOI: 10.1016/j.procir.2018.08.084.
- [6] Bonhoff, T., „Multiphysikalische Simulation und Kompensation thermooptischer Effekte in Optiken für Laseranwendungen“, Dissertation, RWTH Aachen University, Aachen, 2019.