

Auf zwei kaskadierten Phasenmodulatoren basierendes optisches Modul für die flexible Lasermaterialbearbeitung

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

*Lehrstuhl für Technologie Optischer Systeme, RWTH Aachen University

**Fraunhofer-Institut für Lasertechnik, Aachen

<mailto:mario.hesker@tos.rwth-aachen.de>

In dieser Arbeit wird ein breit einsetzbares optisches System vorgestellt, das mit Hilfe von zwei kaskadierten pixelbasierten Phasenmodulatoren (LCoS-SLM) für unterschiedlichste Ablations- und Umschmelzprozesse eingesetzt werden kann. Durch die erlangte volle Kontrolle über Amplitude und Phase wird eine robuste und agile Strahlformung und -führung ermöglicht. Zudem kompensiert die Kombination aus einem neuartigen Monospiegel-Scanner mit einer telezentrischen Fokussieroptik den ablenkwinkelabhängigen Telezentriefehler.

1 Motivation

Konventionell erfolgt in der Lasermaterialbearbeitung die Begegnung von steigenden Prozessanforderungen u.A. mit speziell für einen Bearbeitungsprozess optimierten optischen Systemen, sog. Bearbeitungsköpfen. Mit dem im Folgenden vorgestellten optischen Modul können viele Laserbasierte Verfahrensschritte, wie z.B. Schneiden, Polieren oder Oberflächenstrukturieren kombiniert und konventionelle mechanische sowie (elektro-)chemische Fertigungsverfahren ersetzt werden. Insbesondere wird durch die Verwendung eines zweiachsig ablenkbaren Monospiegel-Scanners der Schnittwinkel manipuliert und über dem gesamten Scan-Feld konstant gehalten, indem der Scan-Feld-abhängige Telezentriefehler minimiert wird.

2 Funktionalitäten für eine flexible Strahlformung und -führung

Durch einen kaskadierten Aufbau (s. Abb. 1) von zwei reflektiven Flüssigkristall-Phasenmodulatoren (LCoS-SLM) können die Amplitude und Phase eines Strahls simultan und dynamisch manipuliert werden [1]. Einerseits ist es dadurch möglich, den Strahl zu (de-) fokussieren oder abzulenken. Andererseits kann eine beliebige Intensitätsverteilung erzeugt oder der Strahl für eine Parallelbearbeitung in mehrere Teilstrahlen aufgeteilt werden.

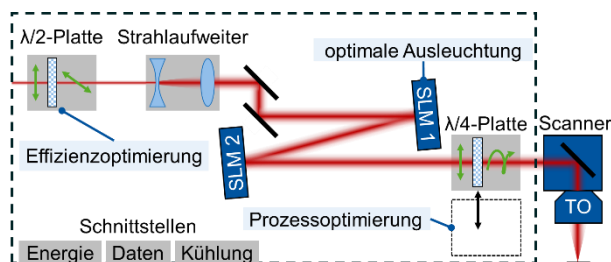


Abb. 1 Optisches Modul mit zwei LCoS-SLM und telezentrischer Optik (TO).

Wird SLM1 zum Aufweiten und SLM2 zum anschließenden Kollimieren des Strahls verwendet, kann der Fokusdurchmesser variiert werden. Durch Aufweiten (SLM1) und zusätzlicher Aberrationskorrektur (SLM2) kann der Fokussierabstand angepasst werden. Wird der Strahl durch SLM1 abgelenkt und durch SLM2 parallel zur optischen Achse ausgerichtet, kann durch den dabei erzeugten Strahlversatz und in Kombination mit einer telezentrischen Fokussieroptik der Auftreffwinkel des Strahls auf dem Werkstück variiert werden.

3 Kompensation des Telezentriefehlers

Bei einem ideal telezentrischen Objektiv treffen unter Verwendung von kollimierter Strahlung, alle von der Eintrittspupille (EP) ausgehenden Strahlen senkrecht auf die Fokusebene. Durch parallel versetztes Einkoppeln wird der Auftreffwinkel des Strahls auf der Fokusebene manipuliert.

Unter Verwendung von Galvanometer-Scannern mit zwei Spiegeln existieren zwei räumlich getrennte Ablenkachsen, sodass der abgelenkte Strahl abhängig vom Scan-Winkel versetzt und schief durch die EP des Objektivs propagiert. (s. Abb. 2).

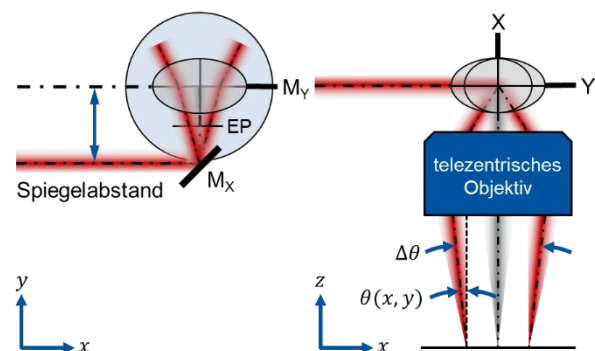


Abb. 2 Strahlaußfallswinkel θ und Telezentriefehler $\Delta\theta$ bei einem Galvanometer-Scanner mit zwei Ablenkspiegeln M_x/M_y .

Hierdurch entsteht ein Telezentriefehler $\Delta\theta$, der einerseits von der Brennweite und dem Spiegelabstand und andererseits vom Auslenkwinkel der Scanner-Spiegel abhängt.

Eine Lösung zur Minimierung des Telezentriefehler ist die Verwendung von zweiachsigen Monospiegel-Scannern [5]. Durch das Vorhandensein eines einzigen Drehpunktes kann die EP des Objektivs mit der Spiegeloberfläche überlagert und dadurch der Telezentriefehler minimiert werden. Obwohl der maximale Auslenkwinkel mit ± 120 mrad im Vergleich zu konventionellen Galvanometer-Scannern vergleichsweise klein ist, eignen sich solche Systeme aufgrund der vergleichbaren Präzision und Dynamik für die Verwendung in Kombination mit den meisten telezentrischen Objektiven.

In Abb. 3 ist der Auftreffwinkel θ über das Scan-Feld exemplarisch für eine ideal telezentrische Fokussieroptik mit 100 mm Brennweite aufgetragen. Unter Verwendung eines Galvanometer-Scanners (a) kann lokal ein Auftreffwinkel von $\theta_{\max} = 4,5^\circ$ erreicht werden. Unter Berücksichtigung des Telezentriefehlers von $\Delta\theta = 2,5^\circ$ ergibt sich für das gesamte Scan-Feld ein max. Auftreffwinkel von $\theta_{\max} = 2,0^\circ$. Mit dem Monospiegel-Scanner (b) ist eine vollständige Kompensation des Telezentriefehlers möglich. Der maximal einstellbare Auftreffwinkel beträgt über das gesamte Scan-Feld $\theta_{\max} = 3^\circ$.

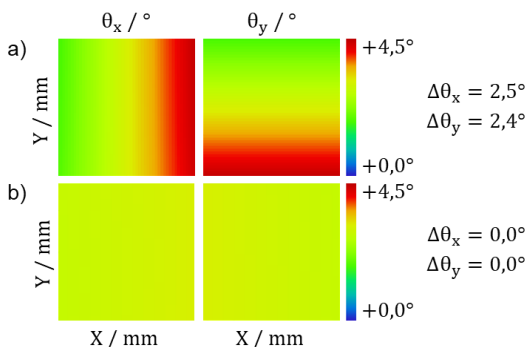


Abb. 3 Auftreffwinkelverteilung θ_x/θ_y im Scan-Feld a) Galvanometer-Scanner b) zweiachsiger Mono-Scanner

4 Weitere Eigenschaften

Die Auslegung der Phasenmasken für die SLM erfolgt mittels diffraktiver neuronaler Netze (DNN). Wesentliche Vorteile dieser Methode sind u.a. die Möglichkeit auf Robustheit gegenüber Toleranzen oder auf eine Schärfentiefe von mehreren cm zu optimieren sowie die Erzeugung unterschiedlicher Intensitätsverteilungen in verschiedenen Zielebenen [4].

Durch die Kombination von maschinellen Lernalgorithmen mit einer in-line Prozessüberwachung sowie einer parallel zum Bearbeitungsprozess durchgeführten 3D-Vermessung der Bauteiloberfläche, wird eine agile Prozessparameteranpassung in Echtzeit realisiert [2,3].

Das optische System ist als abgeschlossenes Modul mit definierten Schnittstellen entwickelt, um die Integration in verschiedene Maschinenarchitekturen zu vereinfachen. Hierbei wird die Kompatibilität zu unterschiedlichen Strahlquellen durch die Integration eines Strahlaufweiters sowie einer $\lambda/2$ -Platte erreicht, um die maximale Effizienz der (polarisationsabhängigen) SLM zu erreichen. Zur Erzeugung von zirkular polarisiertem Licht, besteht die Möglichkeit, eine $\lambda/4$ -Platte mittels Linearachse in den Strahlengang zu integrieren.

5 Ausblick

Die Kombination aus Monospiegel-Scanner und telezentrischem Objektiv ermöglicht eine gezielte Steuerung mit einem ca. 50% größeren Strahlauftrittswinkel über dem gesamten Scan-Feld. Im nächsten Schritt ist die Untersuchung der Strahlwinkelverteilung für Systeme mit realen Objektiven geplant. Zudem soll untersucht werden, inwiefern kommerzielle telezentrische Objektive für den Einsatz mit Monospiegel-Scannern optimiert werden können.

6 Danksagung

Dieses Projekt wurde durch das Forschungs- und Innovationsprogramm Horizon Europe der Europäischen Union unter der Finanzhilfvereinbarung Nr. 101057457 (METAMORPHA) gefördert.



Funded by the
European Union

Literatur

- [1] L. Zhu et. al., "Arbitrary manipulation of spatial amplitude and phase using phase-only spatial light modulators," *Scientific reports*, Vol. 4, 1 Jan. 2014, p. 7441. doi: 10.1038/srep07441.
- [2] M. Zuric et. al., "Multi-Sensor System for Real-Time Monitoring of Laser Micro-Structuring," *JLMN*, 1 Jan. 2019. doi: 10.2961/jlmn.2019.03.0008.
- [3] A. Yuewei et. al., "Process modeling and parameter optimization using radial basis function neural network and genetic algorithm for laser welding of dissimilar materials," *Appl. Phys. A*, Vol. 121, No. 2, 1 Jan. 2015, pp. 555–569. doi: 10.1007/s00339-015-9408-5.
- [4] P. Buske et. al., "High fidelity laser beam shaping using liquid crystal on silicon spatial light modulators as diffractive neural networks," 1 Jan. 2023. doi: 10.1364/opticaopen.24249937.v1.
- [5] Newson NV, "CYCLOPS SINGLE MIRROR DEFLECTION SYSTEMS," URL: <https://www.newson.be/Downloads.htm>.