

Dynamische Steuerung und automatisierte Justage von diffraktiven neuronalen Netzwerken für effektive Laserstrahlformung

Paul Buske*, Moritz Kröger**, Mirco Trosin*, Oskar Hofmann*, Jochen Stollenwerk*,***, Carlo Holly*,***

*RWTH Aachen University - Lehrstuhl für Technologie Optischer Systeme TOS

**RWTH Aachen University - Lehrstuhl für Lasertechnik LLT

***Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT

mailto:paul.buske@tos.rwth-aachen.de

Diffraktive neuronale Netzwerke (DNNs) nutzen kaskadierte diffraktive optische Elemente oder Spatial Light Modulators (SLMs) zur komplexen Laserstrahlformung. Diese Arbeit zeigt, wie ein aus mehreren SLMs bestehendes DNN-System dynamisch und flexibel über Microservices gesteuert und die Justage automatisiert werden kann.

1 Einleitung

In der Lasermaterialbearbeitung steigern anwendungsangepasste Intensitätsverteilungen die Produktionsqualität und -geschwindigkeit erheblich [1]. Diese Intensitätsverteilungen können von einfachen und gleichmäßigen Profilen wie Tophat-Verteilungen bis hin zu komplizierteren Formen wie Donuts oder maßgeschneiderten Verteilungen reichen, die sich aus der Lösung des inversen Wärmeleitungsproblems für bestimmte Prozesse ergeben [2]. Um diese Verteilungen zu erreichen, werden verschiedene Technologien eingesetzt, darunter Freiformoptiken, diffraktive optische Elemente (DOEs) oder räumliche Lichtmodulatoren (SLMs) auf der Basis von Flüssigkristallen auf Silizium (LCoS) [3]. Insbesondere LCoS-SLMs haben den Vorteil, dass sie dynamisch zwischen beliebigen Phasenmasken umschalten können, um eine hochflexible Strahlformung zu ermöglichen. Kürzlich haben wir gezeigt, dass bei der Verwendung von kaskadierten Phasenmasken zusätzliche Designfreiheit in die moderne Laserstrahlformung eingeführt werden kann, indem das optische System als diffraktives neuronales Netzwerk (DNN) behandelt wird [4]. DNNs sind eine physikalische Realisierung neuronaler Netze mit Licht als Information und Phasenmasken als Netzebenen. Ursprünglich für die Bildverarbeitung mit Lichtgeschwindigkeit konzipiert [5], haben wir demonstriert, dass dies auch für den Entwurf komplexer Strahlformungssysteme verwendet werden kann, die effektiv dreidimensionale Laserstrahlformung ermöglichen.

In einer experimentellen Umsetzung mit mehreren kaskadierten SLMs gibt es allerdings viele Freiheitsgrade, die konventionell einen hohen manuellen Justageaufwand erfordern. Ziel dieser Arbeit ist, eine effiziente Steuerung des Systems zu nutzen, um die Justage solcher Systeme zu automatisieren.

2 Ansteuerung über Microservice-Architektur

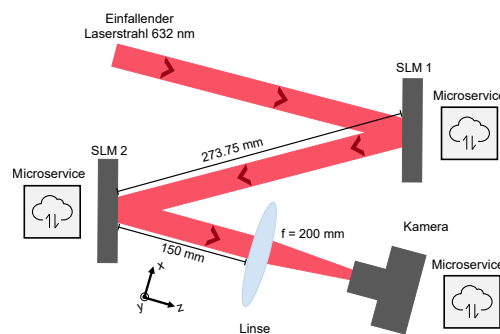


Abbildung 1 Schematische Darstellung des Setups mit zwei SLMs

Microservices sind eine Softwarearchitektur, um große, verteilte Anwendungen zu verwalten. Dabei wird ein System in kleinere, unabhängige Dienste aufgeteilt, die über eine vordefinierte Schnittstelle kommunizieren. Dies erhöht die Modularität, da jeder Dienst separat aktualisiert und integriert werden kann. In dieser Arbeit nutzen wir eine Microservice-Architektur, die ursprünglich für ein Ultrakurzpuls-Ablationssetup entwickelt wurde [6], um einen experimentellen Aufbau mit mehreren SLMs und einer Strahlkamera dezentral ansteuern zu können. Die Ansteuerung wird hier einerseits für die beiden Hamamatsu-X15213 SLMs genutzt, andererseits für eine Basler ace 2 a2A2840-48umPRO Kamera für die Messdatenauswertung (Abb. 1).

3 Justagestrategie

Über eine Pixelverschiebung der mittels SLM abgebildeten Phasenmasken kann ein lateraler Versatz des Eingangsstrahls kompensiert werden. Durch die Kombination zweier SLMs ergeben sich so fünf Justageparameter als die dominanten Parameter: Die Verschiebung in x- und y- Richtung beider SLMs und der Abstand z zwischen den beiden SLMs. Als Metrik für die erfolgte Justage wird eine

Tophat-Intensitätsverteilung genutzt, da sie einfach auf einem Kamerabild detektiert werden und über die Root Mean Square Deviation (RMSD) bewertet werden kann. Da das RMSD-Minimum für eine Tophat-Intensitätsverteilung mit nur einem SLM eindeutig ist (Abb. 2), wird eine Intervallschachtelung genutzt, um so iterativ für jeden SLM die optimale Verschiebung in x- und y-Richtung zu bestimmen. Anschließend erfolgt noch eine Feinjustage von einem System aus zwei kaskadierten Phasenmasken, da diese empfindlicher gegenüber Verschiebungen zueinander sind. Zum Schluss werden Phasenmaskenpaare iterativ durchprobiert, für deren Auslegung von unterschiedlichen Abständen z zwischen den SLMs ausgegangen wird, um den tatsächlichen Abstand zu identifizieren.

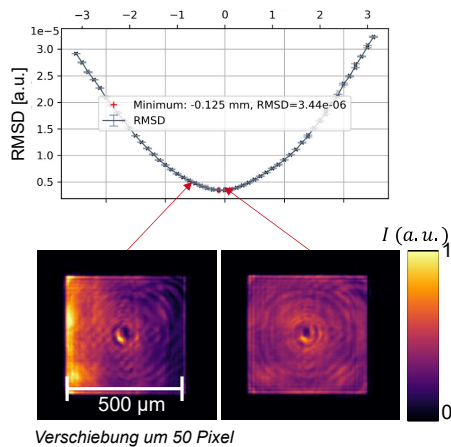


Abbildung 2 Einfluss der Dejustage in X-Richtung bei SLM 2

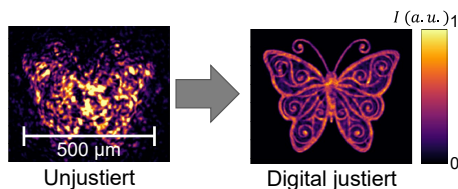


Abbildung 3 Schmetterlingsintensitätsverteilung vor und nach digitaler Justage (Zeitbedarf ca. 4 min).

Durch Einflüsse wie Pixel-Crosstalk und direkter Reflexion am Glas gibt es Abweichungen in der Intensitätsverteilung wie z.B. eine Überhöhung der Intensität in der Mitte der Verteilung ("0-te Beugungsordnung"). Wir haben gezeigt, dass diese mittels DNNs während des Trainings schon korrigiert werden können [7]. Dies ist aber erst sinnvoll, nachdem die finalen Justagepositionen bestimmt wurden, weshalb die Justagephasenmasken in Abb. 2 diese Korrektur nicht enthalten. Beispielhafte Ergebnisse für eine erzielte Intensitätsverteilung unter Nutzung zweier kaskadierter und digital justierter Phasenmasken nach Korrektur der "0-ten Beugungsordnung" sind in Abbildung 3 dargestellt.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Die Methodik zur automatisierten Justage ermöglicht eine praktikable Realisierung von Strahlformungssystemen aus kaskadierten SLMs. Die Justage ist schnell, zuverlässig und durch die dezentrale Microservice-Architektur auf andere Aufbauten übertragbar. Im nächsten Schritt wird die Methodik auf Aufbauten für die UKP Bearbeitung getestet.

5 Danksagung

Gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen der Exzellenzstrategie des Bundes und der Länder – EXC-2023 Internet of Production – 390621612

Literatur

- [1] S. Vogt, A. Völl, S. Wollgarten, T. Freese, J. Stollenwerk, A. Weisheit, and P. Loosen, "Local laser softening of high-strength steel with an adapted intensity," *Journal of Laser Applications* **31**(1), 012007 (2019).
- [2] A. Völl, S. Vogt, R. Wester, J. Stollenwerk, and P. Loosen, "Application specific intensity distributions for laser materials processing: Tailoring the induced temperature profile," *Optics & Laser Technology* **108**, 583–591 (2018).
- [3] F. M. Dickey, L. S. Weichman, and R. N. Shagam, "Laser beam shaping techniques," in *High-Power Laser Ablation III*, C. R. Phipps, ed., vol. 4065, pp. 338 – 348, International Society for Optics and Photonics (SPIE, 2000).
- [4] P. Buske, A. Völl, M. Eisebitt, J. Stollenwerk, and C. Holly, "Advanced beam shaping for laser materials processing based on diffractive neural networks," *Opt. Express* **30**(13), 22798–22816 (2022).
- [5] X. Lin, Y. Rivenson, N. T. Yardimci, M. Veli, Y. Luo, M. Jarrahi, and A. Ozcan, "All-optical machine learning using diffractive deep neural networks," *Science* **361**(6406), 1004–1008 (2018).
- [6] M. Kröger, C. Lasogga, M. Kratz, C. R. Hinke, and C. Holly, "Platform for Adaptive Integration of Data-Driven Models and Simulations Into Ultra Short Pulse Manufacturing Systems," *Journal of Laser Micro/Nanoengineering* **19**(1), 10–19 (2024).
- [7] P. Buske, O. Hofmann, A. Bonhoff, J. Stollenwerk, and C. Holly, "High fidelity laser beam shaping using liquid crystal on silicon spatial light modulators as diffractive neural networks," *Opt. Express* **32**(5), 7064–7078 (2024).