

# Dynamische Hochleistungsstrahlformung mittels LCoS und anschließender Verstärkung

Robin Kurth\*, Fabian Stute\*, Oskar Hofmann\*, Annika Bonhoff\*, Carlo Holly\* \*\*

\*Lehrstuhl für Technologie Optischer Systeme TOS – RWTH Aachen University, Aachen

\*\*Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT, Aachen

[mailto: robin.kurth@tos.rwth-aachen.de](mailto:robin.kurth@tos.rwth-aachen.de)

Für Lasermaterialbearbeitungsprozesse werden zunehmend dynamische Strahlformungselemente für hohe Leistungen erforderlich. In dieser Arbeit demonstrieren wir einen Ansatz, um die Laserstrahlung bei Leistungen unterhalb der Zerstörschwelle des Strahlformungselements zu formen und anschließend mittels eines Verstärkers zu verstärken.

## 1 Einführung

In der industriellen Lasermaterialbearbeitung werden zunehmend komplexe und dynamisch anpassbare Intensitätsverteilungen zur Erhöhung von Bearbeitungsqualität und -effizienz gefordert [1]. Dafür eignet sich z.B. die Technologie der LCoS-SLM (*Liquid Crystal on Silicon-Spatial Light Modulator*), welche eine hochaufgelöste Phasenmodulation erlauben. Durch Aufprägen von zweidimensionalen Phasenmasken können in einer Zielebene hinter dem SLM einstellbare Zielverteilungen erzeugt werden [2]. Der Einsatz in industriellen Anwendungen wird bisher allerdings unter anderem durch die niedrigen Zerstörschwellen (meist unter 200 W) eingeschränkt. Die nutzbare Laserleistung wird weiter eingeschränkt, da bereits unterhalb der Zerstörschwelle thermisch induzierte Effekte auftreten, welche die Strahlformung beeinträchtigen. Für eine Erweiterung des Einsatzbereichs dieser Technologie in Lasermaterialbearbeitungsprozessen sind die Bestrahlung mit Leistungen > 1 kW erforderlich.

Um dynamische Strahlformung oberhalb der Zerstörschwelle zu erreichen, wird in dieser Arbeit der Ansatz verfolgt, den Laserstrahl bei niedriger Leistung unterhalb der Zerstörschwelle zu formen und anschließend mittels eines optischen Verstärkermoduls auf die benötigte Leistung zu verstärken.

## 2 Methoden

Die Phasenmasken werden mittels einer Variation des Gerchberg-Saxton-Algorithmus berechnet. Der iterative Wellenoptische-Propagations-Algorithmus (IWPA) [3] verwendet eine wellenoptische Propagation anstatt der üblichen einzelnen Fourier-Transformation. Dies erlaubt eine Propagation in beliebige Ebenen anstatt der Begrenzung der Propagationsebenen auf das Fernfeld oder die Fokusebene einer Linse. Zusätzlich erlaubt der IWPA die Berücksichtigung nicht-linearer optischer Elemente wie eines optischen Verstärkers im Strahlengang.

Zur Berücksichtigung optischer Elemente wie eines Verstärkers muss das entsprechende Element

physikalisch korrekt modelliert werden. Im IWPA werden optische Elemente durch ihren Einfluss auf die Phase und Amplitude des elektrischen Feldes in einer Ebene modelliert. Der Einfluss des Verstärkers auf die Amplitude des elektrischen Feldes lässt sich in erster Näherung mittels der Formeln (1)-(3) beschreiben [4].

$$I = \frac{1}{2} \cdot c \cdot \epsilon_0 \cdot E_0^2 \quad (1)$$

$$I_{\text{out}} = I_{\text{in}} \cdot G \quad (2)$$

$$G = \frac{I_S}{I_{\text{in}}} \cdot W \left( g_0 \cdot d \cdot \frac{\exp\left(\frac{I_{\text{in}}}{I_S}\right) \cdot I_{\text{in}}}{I_S} \right) \quad (3)$$

$c$  bezeichnet dabei die Lichtgeschwindigkeit,  $\epsilon_0$  ist die elektrische Feldkonstante,  $E_0$  ist die Amplitude des elektrischen Feldes,  $I_{\text{out}}$  ist die Intensität hinter dem Verstärker,  $I_{\text{in}}$  ist die Intensität vor dem Verstärker,  $G$  ist der Verstärkungsfaktor,  $W(x)$  ist die Lambert-W Funktion,  $g_0$  ist die Kleinsignalverstärkung,  $d$  ist die Länge des Verstärkers und  $I_S$  entspricht der Sättigungsintensität. Dabei ist sowohl  $g_0$  als auch  $I_S$  eine Funktion der Pumpleistung. In dieser Arbeit wird die Pumpleistung der Pumpdioden experimentell gemessen und  $g_0$  sowie  $I_S$  werden unter der Annahme einer homogenen Verteilung der Energie im Kristall berechnet.

Durch die absorbierte Pumpleistung bildet sich im Verstärkerkristall eine thermisch induzierte Linse aus, welche die Phase des elektrischen Feldes beeinflusst. Zur Bestimmung der thermischen Linse wird das Strahlprofil an drei Positionen hinter dem Verstärker für einen Betriebspunkt der Pumpdioden vermessen und die thermische Linse im Simulationsmodell auf minimale Abweichung zu den Messdaten optimiert. Die thermische Linse wird als ideales Phasenelement im Zentrum des Verstärkers modelliert.

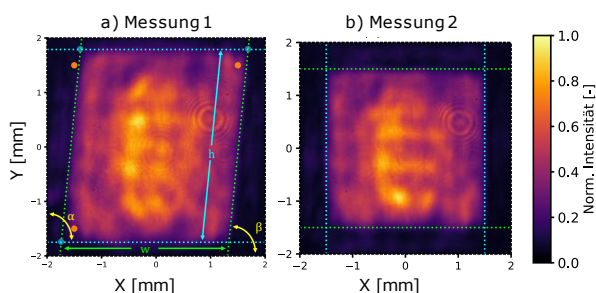
## 3 Experimenteller Aufbau

Die verwendete Laserquelle ist ein IPG YLR-30-1064-LP ( $\lambda = 1064 \text{ nm}$ ;  $M^2 = 1,1$ ;  $P_{\text{max}} =$

30 W;  $w_0 = 2,4$  mm). Der LCoS-SLM, ein Hamamatsu X10468, wird unter einem Inzidenzwinkel von ca.  $7^\circ$  beleuchtet und ist nicht gekühlt. Das Verstärkermodul besteht aus einem Slabverstärker (Nd:YVO<sub>4</sub>; Größe: 18 mm x 1,2 mm x 15 mm). Der Kristall wird mittels eines Diodenstacks ( $\lambda = 808$  nm) einseitig endgepumpt. Aufgrund der geringen Höhe des Kristalls in die y-Dimension muss der geformte Laserstrahl in den Verstärker fokussiert werden, um Vignettierung zu vermeiden. Zur Fokussierung und anschließenden Kollimation wird ein symmetrischer Aufbau aus zwei Zylinderlinsen ( $f_y = 200$  mm) verwendet. Durch einen dichrotischen Spiegel wird der geformte Laserstrahl mit dem Pumplicht überlagert und in den Verstärker eingekoppelt. Mittels eines zweiten dichrotischen Spiegels hinter dem Verstärker wird der nun verstärkte Laserstrahl wieder vom Pumplicht getrennt.

#### 4 Ergebnisse

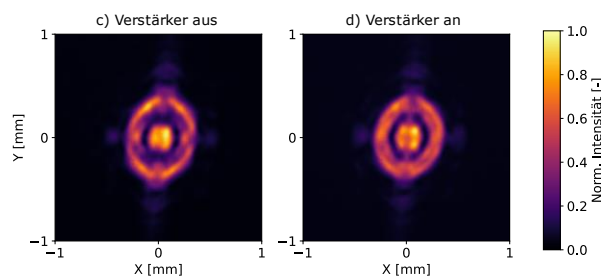
Die Propagation der errechneten Phasenmasken durch den Verstärker führt zu einer Verzerrung der gemessenen Intensitätsverteilung in der Zielebene (siehe Abb.1 a)). Mittels einer Kantenerkennung und der Sollposition der Zielverteilung (orange Punkte, gelbe Winkel und grüne und blaue Pfeile) wird eine Transformationsmatrix ermittelt, welche invertiert und zur Vorkompensierung der Verzerrung auf die Zielverteilungen angewendet wird (siehe Abb. 1 b)). Da sich die Verzerrung so kompensieren lässt, ist dieser Effekt wahrscheinlich auf eine unzureichende Justage, oder Fertigungsfehler im Verstärkerkristall zurückzuführen und nicht auf einen Fehler in der Simulation.



**Abb. 1** Messung der unkorrigierten Intensitätsverteilung a) und der korrigierten Intensitätsverteilung b).

Um zu zeigen, dass der entwickelte Ansatz die Verstärkung berücksichtigt, wird das durch eine Phasenmaske, welche für einen eingeschalteten Verstärker berechnet wird, beeinflusste Licht einmal bei eingeschaltetem und einmal bei ausgeschaltetem Verstärker durch das optische System propagiert (siehe Abb. 2). Zielverteilung ist ein Ring mit Kern mit jeweils homogener Intensität. Bei ausgeschaltetem Verstärker weist der äußere Ring der Verteilung deutliche Inhomogenitäten auf. Erst bei eingeschaltetem Verstärker ist der äußere Ring der Verteilung näherungsweise homogen, was zeigt, dass der

Einfluss der Verstärkung simuliert und somit vorkompensiert werden kann.



**Abb. 2** Messung der Intensitätsverteilung bei ausgeschaltetem Verstärker c) und bei eingeschaltetem Verstärker d).

Um eine Beschädigung des Strahlformers zu vermeiden, werden derzeit Leistungen bis 3 W verwendet. Dabei werden Verstärkungsfaktoren bis  $G = 1,6$  realisiert, was einem Leistungsgewinn des Laserstrahls entspricht.

#### 5 Zusammenfassung und Ausblick

Mit dem vorgestellten Ansatz ist es möglich, einen Verstärker zu modellieren und bei der Berechnung von Phasenmasken für die Strahlformung zu berücksichtigen. Mittels der berechneten Phasenmasken wird Strahlformung durch ein optisches System mit einem LCoS-SLM und einem Verstärker bei einem Verstärkungsfaktor von  $G = 1,6$  erreicht.

In Zukunft wird die Strahlformung durch das vorhandene optische System weiter charakterisiert. Darüber hinaus gilt es die verwendete Leistung des Eingangsstrahls bis an die Grenze des LCoS-SLM zu erhöhen, um nach der Verstärkung Leistungen oberhalb der Zerstörschwelle zu erreichen.

#### 6 Förderung

Gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) – Projektnummer 387868000

#### Literatur

- [1] Jäger, U.; Fertig, F.; Oesterlin, P. et al.: Beam Shaping for High Throughput Laser Doped Selective Emitter Solar Cells (2011). <https://doi.org/10.4229/26thEUPVSEC2011-2BV.1.49>.
- [2] Laser beam shaping – Theory and techniques. CRC Press, Boca Raton, Fla., 2014.
- [3] Hofmann, O.; Buske, P.; Kurth, R. et al.: Beyond the IFTA – Phase mask generation for 3D laser beam shaping, tailored temperature distributions and optical amplifiers (2025). <https://doi.org/10.1051/jeos/2025013>.
- [4] Koechner, W.: Solid-State Laser Engineering, Springer Series in Optical Sciences no. 1, Springer, New York, NY, 2006.