

# Modellbasierte Strahlformung mittels diffraktiver optischer Elemente für die Lasermaterialbearbeitung

Robin Kurth\*, Oskar Hofmann\*, Yarkin Colak\*, Annika Bonhoff\*, Jochen Stollenwerk\* \*\*, 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>

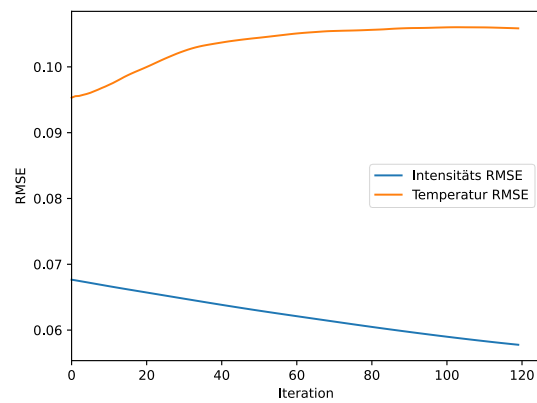
Für die Lasermaterialbearbeitung ist die Temperaturverteilung im Werkstück von entscheidender Bedeutung. In dieser Arbeit demonstrieren wir die Kopplung eines Algorithmus zur Auslegung von Strahlformungselementen mit einem Algorithmus zur Lösung des inversen Wärmeleitungsproblems und erreichen dadurch eine Reduzierung der Abweichung von einer Temperaturvorgabe um 70%.

## 1 Einleitung

In der industriellen Lasermaterialbearbeitung werden zunehmend komplexe und dynamisch anpassbare Leistungsdichteverteilungen (LDV) zur Erhöhung von Bearbeitungsqualität und -effizienz gefordert [1]. Dabei eignet sich z.B. die Technologie der LCoS-SLM (*Liquid Crystal on Silicon-Spatial Light Modulator*) für die Umsetzung. Diese erlauben eine hochaufgelöste Phasenmodulation sowie eine dynamische Anpassung derselben. Durch Aufprägen von sogenannten Phasenmasken können in einer Zielebene hinter dem SLM annähernd beliebige Zielverteilungen erzeugt werden [2]. Für die Lasermaterialbearbeitung ist allerdings nicht die erzeugte LDV auf dem Werkstück von Relevanz, sondern die dadurch induzierte Temperaturverteilung.

Welche LDV für eine gewünschte resultierende Temperaturverteilung benötigt wird, lässt sich durch Lösen des inversen Wärmeleitungsproblems (engl.: inverse heat conduction problem - IHCP) bestimmen [3]. Bisherige Ansätze gehen bei der Strahlformung in zwei Schritten vor. Zuerst wird über die Lösung des IHCP eine notwendige LDV bestimmt und anschließend wird, getrennt davon, durch einen Strahlformungsalgorithmus eine Phasenmaske bestimmt, welche die gesuchte LDV erzeugt.

Aufgrund der begrenzten Auflösung von realen SLM kommt es zu einer Abweichung von der angestrebten LDV (siehe Abbildung 2). Diese Abweichung wird von dem Strahlformungsalgorithmus minimiert, während die Temperaturvorgabe nicht explizit betrachtet wird. Durch den nicht-linearen Zusammenhang zwischen LDV und Temperatur kann dies, wie in Abbildung 1 zu sehen, zu einer Reduktion RMSE (siehe Gleichung (2)) hinsichtlich der LDV führen, während der RMSE bezüglich der Zieltemperaturverteilung ansteigt. Dieses Verhalten zeigt die Notwendigkeit der expliziten Optimierung hinsichtlich der Temperaturverteilung bei der Phasenmaskenauslegung.



**Abbildung 1** Verlauf des RMSE über der Iterationszahl bei Optimierung hinsichtlich der LDV für eine homogene Temperaturverteilung.

## 2 Methoden

Für die Berechnung des inversen Wärmeleitungsproblems (IHCP) wird die Implementierung von Völl [3] verwendet. Für diese Arbeit wird von einer konstanten relativen Bewegung zwischen Laser und Werkstück ausgegangen. Die Berechnungen werden für 100Cr6 durchgeführt.

Die Berechnung der Phasenmaske erfolgt durch einen angepassten iterativen Fourier-Transformations-Algorithmus (IFTA) [4]. Zur Erhöhung der Konvergenzrate wird die aktuelle Zielverteilung in Abhängigkeit der aktuell erzeugten LDV angepasst. Die Anpassung erfolgt nach Gleichung (1). Dabei entspricht  $X_{\text{angepasst}}$  der angepassten Zielverteilung, welche für die inverse Fourier-Transformation genutzt wird, und  $A$  einem Anpassungsfaktor.  $X_{\text{soll}}$  ist die Zielvorgabe und  $X_{\text{ist}}$  ist die aktuell erzeugte Verteilung.

$$X_{\text{angepasst}} = (1 + A) \cdot X_{\text{soll}} - A \cdot X_{\text{ist}} \quad (1)$$

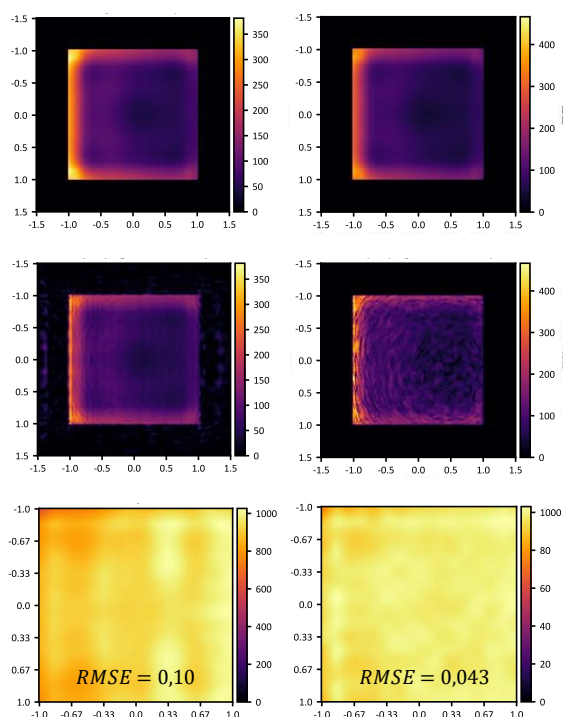
Für die Bewertung der Zielverteilungen wird die Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers (engl. *root mean square error*, RMSE) verwendet (2).

Dabei entspricht  $n$  der Pixelanzahl des Detektors und  $X$  der Messgröße an der Position eines Pixels  $i$ .

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \left( \frac{X_{soll,i}}{X_{max}} - \frac{X_{ist,i}}{X_{max}} \right)^2} \quad (2)$$

Diese Methode führt einen pixelweisen Abgleich der Werte zwischen Messung bzw. Simulation und Zielverteilung durch.

Durch die Kopplung des IFTA mit dem IHCP wird explizit hinsichtlich einer Temperaturverteilung optimiert. Ohne Kopplung wird die Zielintensität nach Gleichung (1) direkt in den Algorithmus rückgekoppelt. Durch die Kopplung wird zunächst eine Temperatur berechnet. Diese wird in Abhängigkeit der Temperaturvorgabe und Gleichung (1) angepasst, bevor durch den IHCP wieder eine LDV berechnet wird, die in den IFTA rückgekoppelt wird.



**Abbildung 2** Die linke Spalte zeigt das Strahlformungsergebnis für die entkoppelte Berechnung. Die rechte Spalte zeigt das Ergebnis für die gekoppelte Berechnung der Phasenmaske. Zielverteilung ist eine homogene Temperaturverteilung.

### 3 Simulative Validierung

In Abbildung 2 ist das Strahlformungsergebnis bei entkoppelter Berechnung dem Ergebnis mit gekoppelter Berechnung gegenübergestellt. Der Faktor  $A$  wurde für diese Berechnung zu eins gesetzt. Die Zielverteilung ist ein homogener Temperaturbereich mit einer Temperatur von 1000°C und den Dimensionen 1 mm x 1 mm. Zu sehen ist, dass die LDV bei entkoppelter Berechnung einen deutlich weicheren

Verlauf und niedrigere Spitzenwerte aufweist. Die resultierende Temperaturverteilung zeigt allerdings deutliche Inhomogenitäten und weist einen RMSE von 0,1 auf. Bei gekoppelter Berechnung hingegen ist die LDV deutlich inhomogener als die Zielvorgabe. Dabei ist die resultierende Temperaturverteilung deutlich homogener, was sich auch in einem über 50% niedrigeren RMSE von 0,043 zeigt. Damit kann gezeigt werden, dass die Kopplung zu einer Verringerung der Abweichung hinsichtlich der Temperaturvorgabe führt.

Durch eine Variierung des Faktors  $A$  konnte eine weitere Verringerung des RMSE bezüglich der Zieltemperaturverteilung erzielt werden. Für die verwendete Zielverteilung ergab sich für einen Faktor von  $A = 1,5$  ein RMSE von 0,024, was einer Verringerung von über 70% entspricht. Dabei gilt es zu beachten, dass der Faktor  $A$  einen signifikanten Einfluss auf das Optimierungsverhalten des Algorithmus hat und je nach Anwendung individuell gewählt werden muss. Für noch größere Werte von  $A$  wird der Algorithmus instabil und konvergiert nicht mehr.

### 4 Zusammenfassung und Ausblick

Mit dem vorgestellten Ansatz ist es möglich, Phasenmasken für die Laserstrahlformung hinsichtlich einer Zieltemperaturverteilung zu optimieren und so einen um 70% niedrigeren RMSE im Vergleich zu herkömmlichen Herangehensweisen zu erzielen.

Der entwickelte und simulativ validierte Ansatz wird in Zukunft an einem experimentellen Aufbau validiert. Darüber hinaus wird der Einfluss weiterer Parameter auf das Strahlformungsergebnis untersucht.

### 5 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] Völl, A.: Methodology for the identification and implementation of application specific intensity distributions for material processing with laser radiation, RWTH Aachen University, 2020.
- [4] Fienup, J.R.: Iterative Method Applied To Image Reconstruction And To Computer-Generated Holograms. In: Optical Engineering 19 (1980), Heft 3. <https://doi.org/10.1117/12.7972513>.