

# Kompensation von Dezentrierung und Rotation bei der Vermessung von mittels SLM erzeugten Intensitätsverteilungen

Robin Kurth\*, Tobias König\*, 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>

Bei der Aufnahme von Messdaten kann eine nicht ideale Detektorpositionierung zu Rotation und Dezentrierung in den aufgenommenen Daten führen. Durch eine Referenzmessung lässt sich eine Transformationsvorschrift zur Kompensation des Detektoreinflusses ableiten.

## 1 Einleitung

In der industriellen Lasermaterialbearbeitung werden zunehmend komplexe und dynamisch anpassbare LDVs zur Erhöhung von Bearbeitungsqualität und -effizienz gefordert [1, 2]. 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 [3]. Dabei kann die gewünschte LDV nicht nur auf der Strahlachse erzeugt werden, sondern es ist zusätzlich möglich, die LDV in der Zielebene frei zu positionieren. Die so erzeugten LDVs sollen mit einem Detektor aufgenommen werden, um automatisiert die Zielverteilung und die Sollposition bewerten zu können. Dies erfordert eine derart gestaltete Datenaufnahme, dass eine aussagekräftige Bewertung der Messdaten möglich ist.

Für die Bewertung der erzeugten LDVs wird die mittlere quadratische Abweichung (engl.: MSE) verwendet (1). Dabei entspricht  $n$  der Pixelanzahl des Detektors und  $I$  der Intensität an der Position eines Pixels  $i$ .

$$\text{MSE} = \sum_{i=1}^n \left( \frac{\left( \frac{I_{\text{soll},i} - I_{\text{ist},i}}{I_{\text{soll},\text{max}} - I_{\text{ist},\text{max}}} \right)^2}{n} \right) \quad (1)$$

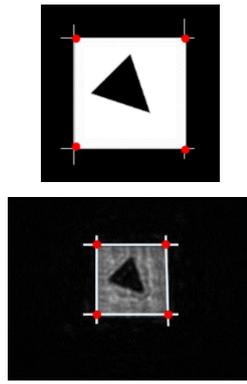
Diese Methode führt einen pixelweisen Abgleich der Werte zwischen Messung und Zielverteilung durch. Daraus folgt, dass Messung und Zielverteilung in Auflösung sowie Bildausschnitt übereinstimmen müssen, um einen sinnvollen Vergleich zu erlauben. Da nicht immer davon auszugehen ist, dass der Detektor in diesen Eigenschaften der simulierten Zielverteilung entspricht, müssen die Messdaten so verarbeitet werden, dass eine Bewertung durchgeführt werden kann. Ein weiterer Aspekt ist, dass im Gegensatz zur Simulation des optischen Systems nicht angenommen werden kann, dass der

Detektor exakt auf der optischen Achse positioniert ist. Zusätzlich kann der Detektor um die optische Achse verdreht sein. Da eine Drehung und ein Versatz von der Strahlachse sowohl durch die Phasenmaske als auch durch einen nicht-ideal positionierten Detektor in die Messung einfließen können, muss der Einfluss der Detektor-induzierten Abweichungen eliminiert werden, um eine Bewertung der gemessenen LDVs durchführen zu können.

## 2 Methoden

Um die Detektor-induzierten Abweichungen zu kompensieren, wird eine Transformation der Messdaten durchgeführt. Die Transformation gleicht eventuelle Fehlpositionierungen und Verdrehungen des Detektors aus. Zusätzlich werden die Auflösung und der Bildausschnitt zwischen Messung und Zielverteilung angepasst. Zuletzt sollen auch Spiegelungen, die durch unterschiedliche Betrachtungsrichtungen der Zielebene auftreten, kompensiert werden. Zur Bestimmung der Abweichungen wird eine Referenzgeometrie auf den Detektor abgebildet, welche auf der optischen Achse positioniert ist. Die Referenzgeometrie ist zudem so gewählt, dass keinerlei Symmetrien existieren, wodurch Spiegelungen und Drehungen eindeutig bestimmt werden können (siehe obere Grafik in Abbildung 2).

Die Transformationsvorschrift wird dabei wie folgt bestimmt: Zuerst wird anhand der Positionierung der Innengeometrie bestimmt, ob bei den aufgenommenen Daten eine Spiegelung vorliegt und im Zweifelsfall kompensiert. Die Soll-Referenzgeometrie und die Messung der Referenzgeometrie werden daraufhin in ein Binärbild umgewandelt. Mit einem Bilderkennungsalgorithmus der Python-Bibliothek *OpenCV* [4] werden in diesen Bildern Außenkonturen erkannt. An den Schnittpunkten der Konturen lassen sich wiederum Eckpunkte identifizieren. Die Eckpunkte von Soll-Zielverteilung und der Messung werden in Beziehung zueinander gesetzt, woraus sich eine Transformationsvorschrift ableiten lässt.



**Abbildung 1** Die obere Grafik zeigt die Soll-Zielverteilung mit identifizierten Kanten und Eckpunkten. Die untere Grafik zeigt die Messdaten mit identifizierten Kanten und Eckpunkten.

Mit dem Wissen über die Auflösung des Detektors und der Soll-Zielverteilung lässt sich die Auflösung der Messdaten im gleichen Schritt anpassen. Die so ermittelte Transformationsvorschrift kann nun auf alle weiteren Messdaten derselben Messreihe angewendet werden. Die resultierenden Daten sind zur optischen Achse ausgerichtet und können bezüglich der Detektor-induzierten Abweichungen bereinigt bewertet werden.

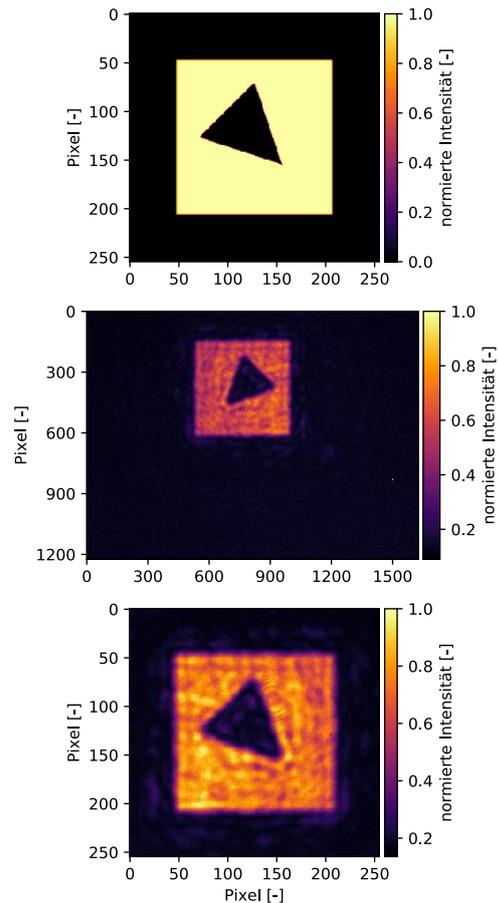
### 3 Experimentelle Validierung

In Abbildung 2 sind die Soll-Zielverteilung, die originalen Messdaten und die transformierten Messdaten zu sehen. Nach der Kompensation der Detektor-induzierten Abweichungen und Anpassung an die Auflösung der Soll-Zielverteilung beläuft sich der MSE der Messdaten auf 0,08. Dies ist der Fehler unter Kompensation der Detektor-induzierten Abweichungen. Dieser Wert kann nun zielgerichtet durch weitere Optimierung der Phasenmaske und des optischen Systems reduziert werden.

### 4 Zusammenfassung und Ausblick

Mit dem vorgestellten Ansatz ist es möglich, die Vergleichbarkeit von Messdaten unterschiedlicher Messreihen und bei nicht idealer Positionierung des Detektors zu gewährleisten. Zusätzlich werden die Detektor-induzierten Abweichungen der Messdaten kompensiert, was eine reine Bewertung der Phasenmasken-induzierten Abweichungen ermöglicht.

Mit der so entwickelten Technik sollen in einer zukünftigen Arbeit Daten für das Training neuronaler Netzwerke aufgenommen werden, welche eine dynamische Generierung von Phasenmasken zur Strahlformung erlaubt.



**Abbildung 2** Die obere Grafik zeigt die Soll-Zielverteilung, die mittlere Grafik zeigt die unverarbeiteten Messdaten und die untere Grafik zeigt die Messdaten nach Anwendung der Transformation.

### 5 Förderung

Gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) – Projektnummer 387868000

### Literatur

- [1] Račiukatis, G.: Laser Processing by Using Diffractive Optical Laser Beam Shaping Technique. In: Journal of Laser Micro/Nanoengineering 6 (2011), Heft 1, S. 37-43. <https://doi.org/10.2961/jlmn.2011.01.0009>.
- [2] 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>.
- [3] Laser beam shaping – Theory and techniques. CRC Press, Boca Raton, Fla., 2014.
- [4] OpenCV. 2023, <https://opencv.org/>.