

Dynamische Fokuslagenmessung mittels Amplitudenmaske und neuronaler Netze

Jörg Hofmann*, Paul, Kara*, Jochen Stollenwerk* **, Carlo Holly* **

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

** Fraunhofer-Institut für Lasertechnik, Aachen

<mailto:joerg.hofmannr@tos.rwth-aachen.de>

Die Ausbildung einer thermischen Linse in einem optischen System für die Lasermaterialbearbeitung führt zu einer Fokusverschiebung und damit zu einer verminderten Bearbeitungsqualität oder im Extremfall zum Abbruch des Bearbeitungsprozesses. In diesem Beitrag wird eine Vorrichtung zur Messung und Kompensation der thermischen Fokusverschiebung vorgestellt. Zur Messung wird ein in der Bearbeitungsebene sichtbares, durch eine Amplitudenmaske erzeugtes Beugungsmuster genutzt und die Messdaten werden anschließend mithilfe neuronaler Netze analysiert.

1 Einführung

Optische Systeme werden in der Lasermaterialbearbeitung insbesondere zur Strahlführung und -formung eingesetzt. Bei Laserleistungen im Multi-Kilowatt-Bereich führt das in den optischen Elementen absorbierte Laserlicht zu deren Erwärmung. Dadurch entsteht der sogenannte thermische Linseneffekt, der zu einer Brennweitenänderung des optischen Systems und damit zu einer Verschiebung der Fokuslage relativ zum Werkstück führt. Somit verringert sich die Intensität der Laserstrahlung auf dem Werkstück, was zu einer verminderten Bearbeitungsqualität oder sogar zum Abbruch des Bearbeitungsprozesses führen kann [1]. Die meisten in der Literatur beschriebenen Messmethoden sind ausschließlich in der Lage, die tatsächliche Strahlgröße mit der Soll-Strahlgröße ohne thermische Effekte in der Bearbeitungsebene zu vergleichen [2]–[4]. Eine echtzeitfähige Fokuslagenmessung ist daher nicht möglich. In diesem Beitrag wird ein optisches Messverfahren zur dynamischen Bestimmung der Fokuslage untersucht. Die Bestimmung der Fokuslage basiert auf einem Beugungsmuster, das durch eine Amplitudenmaske in Fokussnähe erzeugt wird. Das Beugungsmuster wird mithilfe zuvor trainierter neuronaler Netze ausgewertet.

2 Messprinzip

Das Funktionsprinzip der hier verwendeten Bahtinov-Maske, welche aus drei relativ zueinander angeordneten Beugungsgittern besteht, ist schematisch in **Abb. 1** dargestellt. Wird diese kohärent beleuchtet und das Licht anschließend mithilfe einer Linse fokussiert, so wird in der Fokusebene ein charakteristisches Beugungsmuster beobachtet. Dieses besteht aus der Superposition der Beugungsordnungen der einzelnen Teilgitter, wobei die Beugungsordnungen eines einzelnen Teilgitters jeweils entlang einer Linie verlaufen. Befindet sich der

Detektor in der Fokusebene der Linse, so schneiden sich alle Linien in einem Punkt (**Abb. 1**, links).

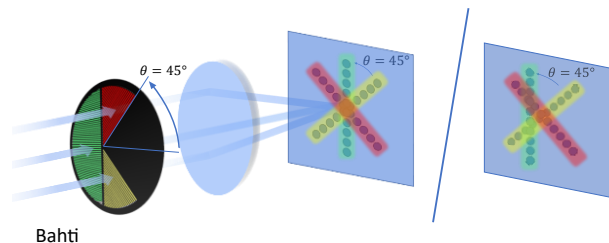


Abb. 1: Funktionsprinzip der Bahtinov-Maske.

Außerhalb des Fokus tritt hingegen ein Abstand zwischen dem Schnittpunkt der gelben und roten Linie mit der grünen Linie auf (**Abb. 1**, rechts). Dieser Abstand ist proportional zur Fokuslagenverschiebung Δf . Der Versuchsaufbau zur Generierung der Messdaten ist schematisch in Abbildung 2 dargestellt.

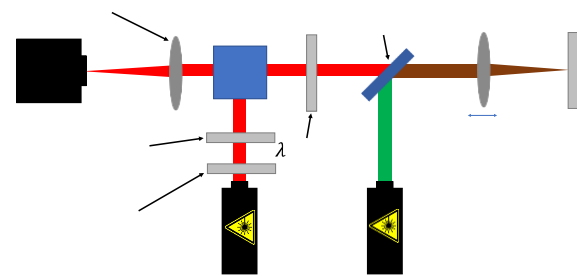


Abb. 2: Schematische Darstellung der koaxialen Messung der Fokuslage.

In grün ist zunächst der Strahlengang des Prozesslasers bis zur Prozessebene dargestellt. Koaxial hierzu wird ein Laserstrahl anderer Wellenlänge eingekoppelt, welcher zunächst die Bahtinovmaske und einen Strahlteiler durchläuft. Das auf dem Werkstück erzeugte Beugungsmuster wird anschließend mithilfe eines Objektivs auf eine Kamera

abgebildet. Die Fokusslage kann über die Verschiebung einer Linse mittels Translationsachse eingestellt werden.

3 Fokusslagenbestimmung mittels Transfer Learning

Zur Fokusslagenbestimmung anhand des Beugungsmusters werden bei unterschiedlichen Linsenpositionen in einem Bereich von $\pm 2,5$ mm 1251 Intensitätsprofile wellenoptisch simuliert und ausgewertet. Durch die Änderung der Linsenposition findet eine gezielte Verschiebung der Fokusslage statt. Die Intensitätsprofile werden anhand ihrer Positionsangabe gelabelt und anschließend in 80% Trainingsdaten und jeweils 10% Validierungs- und Trainingsdaten aufgeteilt. Für die Implementation der neuronalen Netze wird die python-Bibliothek „PyTorch Lightning“ verwendet. Da als Ausgangspunkt bereits für die Bilderkennung vortrainierte neuronale Netze verwendet werden, handelt es sich hierbei um sogenanntes „Transfer Learning“. Anschließend werden die simulierten Daten mit experimentellen Messdaten eines identischen Aufbaus verglichen.

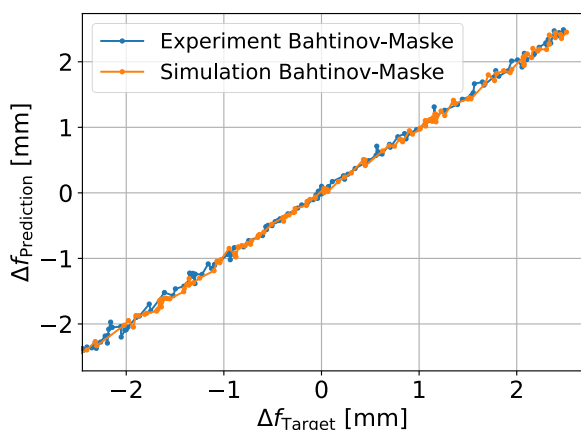


Abb. 3: Fokuslagenbestimmung mittels Transfer Learning

Die bei unterschiedlichen Fokusslagenverschiebungen Δf_{Target} aufgezeichneten Mess- und Simulationsdaten sind in **Abb. 3** den mittels neuronalen Netzes ermittelten Fokussverschiebungen $\Delta f_{\text{Prediction}}$ gegenübergestellt. Sowohl für die Mess- als auch die Simulationsdaten wird ein lineares Verhalten mit Steigungen zwischen 0,995 und 0,998 ermittelt. Die Mess- und Simulationsdaten schwanken mit einer mittleren Abweichung von $40,54 \mu\text{m}$ bzw. $42,52 \mu\text{m}$ um die tatsächlich vorliegenden Fokussverschiebung Δf_{Target} (siehe **Abb. 4**). Mit dem Abstand z von der Fokusslage wird eine Zunahme der Abweichung zwischen der ermittelten Fokussverschiebung $\Delta f_{\text{Prediction}}$ und der vorliegenden Fokussverschiebung Δf_{Target} festgestellt.

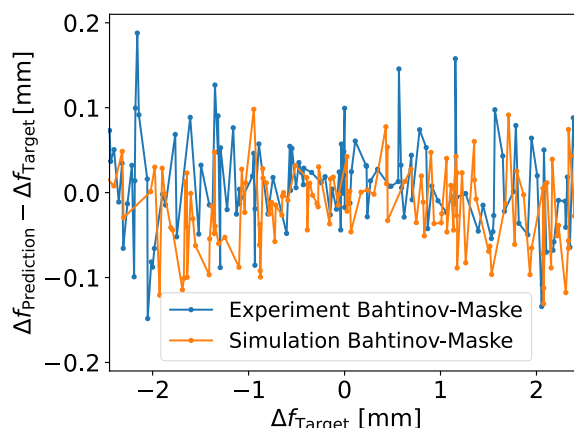


Abb. 4: Abweichung zwischen vorhandener und ermittelter Fokussverschiebung.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Mittels Transfer Learning ist eine koaxiale Bestimmung der Fokusslage mit einer mittleren Abweichung von kleiner $43 \mu\text{m}$ innerhalb eines Fokusslagenbereichs von $\pm 2,5$ mm außerhalb der Prozessebene möglich. Die Abweichung zwischen vorhergesagter Fokusslage und tatsächlich vorhandener Fokusslage nimmt mit dem Abstand vom Fokus zu. Zukünftig ist daher ein Training verschiedener neuronaler Netze für jeweils weiter- und kleiner gefasste Messbereiche denkbar. Über ersteres findet eine grobe Bestimmung des Fokusabstandes und über letzteres eine nachgelagerte präzise Bestimmung des Fokusabstandes statt. Außerdem wird die Integration des Messprinzips im Rahmen einer industriellen Lasermaterialbearbeitungsanlage angestrebt.

5 Literaturverzeichnis

- [1] S. Piehler, C. Thiel, A. Voss, M. Abdou Ahmed, T. Graf, „Self-compensation of thermal lensing in optics for high-brightness solid-state lasers“ in *High Power Laser Materials Processing: Lasers, Beam Delivery, Diagnostics, and Applications*: SPIE (2012), 82390Z.
- [2] F. Abt, A. Hess und F. Dausinger, „Temporal behaviour of the focal shift of beam forming optics for high power single mode lasers“, *ICALEO*, 561–568 (2008).
- [3] J. L. Guttman, J. M. Fleischer und M. E. Minshall, „BEAMSCATTERING LASERMONITOR“, März 24, 2015.
- [4] J.-M. Weick, „Vorrichtung zur Fokussierung eines Laserstrahls und Verfahren zum Überwachen einer Laserbearbeitung“, Juni 25, 2015.