

Simulation des Einflusses von prozessangepassten Intensitätsverteilungen und Streueffekten beim Laserdurchstrahlschweißen

Jacqueline Dahlmanns*, Annika Bonhoff*, Jochen Stollenwerk**, Carlo Holly**

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

**Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT, Aachen

<mailto:jacqueline.dahlmanns@tos.rwth-aachen.de>

Mit Hilfe des inversen Wärmeleitproblems werden prozessangepasste Intensitätsverteilungen für das Laserdurchstrahlschweißen berechnet und mit aktuell verwendeten Intensitätsverteilungen verglichen. Dabei wird insbesondere die Streuung im transparenten Fügepartner berücksichtigt.

1 Einführung

Beim Laserdurchstrahlschweißen werden ein transparenter und ein opaker Kunststoff miteinander verbunden, indem der Laserstrahl im opaken Kunststoff absorbiert wird und so zur Erhitzung und Aufschmelzung an der Grenzfläche führt. Durch die Nachfrage nach teilkristallinen Kunststoffen mit hoher Flammwidrigkeit werden zunehmend streuende Werkstoffe für den transparenten Fügepartner eingesetzt. Diese zusätzliche Streuung führt zu Verbrennungen an der Bauteiloberfläche. Daher können aktuell, insbesondere bei komplexen Nahtgeometrien, nur vergleichsweise geringe Leistungen und Vorschubgeschwindigkeiten umgesetzt werden. In der vorliegenden Arbeit werden prozess- und werkstoffangepasste Intensitätsverteilungen für das Laserdurchstrahlschweißen berechnet und im Vergleich zu gängigen Gauß-, Tophat- oder M-shape-Verteilungen untersucht (siehe Abb. 1).

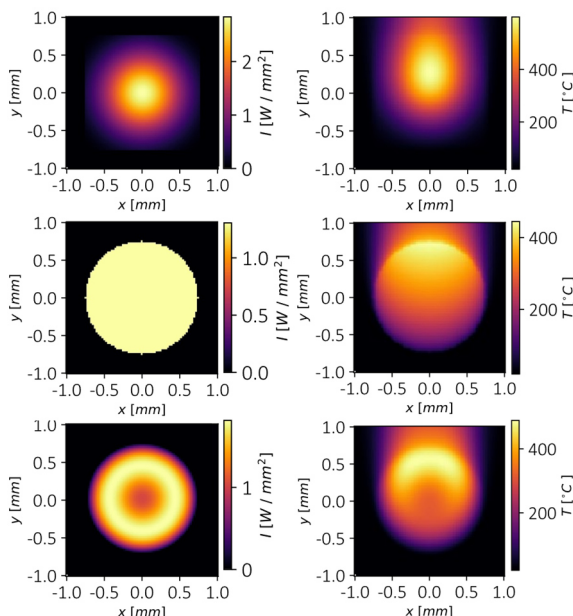


Abb. 1 Gauß-, Tophat- und M-shape [1] Intensitätsverteilung (links) sowie die daraus resultierende Temperaturverteilung in der Fügeebene (rechts) für eine Kombination aus PC und PC/ABS-GF20.

Für die Simulationen werden im Folgenden zwei 1 mm dicke Platten und eine Vorschubgeschwindigkeit von $v_y = -0,01$ m/s angenommen. Als Material wird zuerst PC (transparent) und PC/ABS-GF20 (opak) verwendet.

Mit diesen Parametern sind in Abbildung 1 die drei typischen Intensitätsverteilungen fürs Laserdurchstrahlschweißen und die daraus resultierende Temperaturverteilung beispielhaft dargestellt. In allen drei Fällen wird keine homogene Temperaturverteilung quer zur Vorschubgeschwindigkeit erzielt und damit keine homogene Schweißnaht erreicht.

2 Problemstellung als inverses Wärmeleitproblem

Um eine homogene Temperaturverteilung zu erzielen, sollen prozess- und werkstoffangepasste Intensitätsverteilungen eingesetzt werden. Grundlage zur Ermittlung dieser ist die Wärmeleitungsgleichung. Während beim direkten Problem durch verschiedene Methoden (z.B. FEM oder FDM) aus der Intensitäts- die Temperaturverteilung im Bauteil ermittelt werden kann, werden spezifische Optimierungsalgorithmen benötigt, um beim inversen Problem aus einer vorgegeben Temperaturverteilung die benötigte Intensitätsverteilung zu berechnen [2].

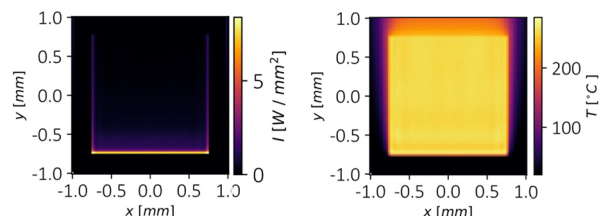


Abb. 2 Optimierte Intensitätsverteilung (links) für eine homogene Temperaturverteilung von 260°C und resultierende Temperaturverteilung in der Fügeebene (rechts) für eine Kombination aus PC und PC/ABS-GF20.

Für eine homogene Temperaturverteilung (hier: Schmelztemperatur von 260°C) folgt durch Lösen des inversen Wärmeleitproblems die in Abbildung 2

dargestellte optimierte Intensitätsverteilung für die zuvor genannten Prozessparameter. Durch die angepasste Intensitätsverteilung wird sowohl quer als auch längs zur Vorschubrichtung eine nahezu konstante Temperaturverteilung erzielt.

3 Simulation von Streuung im transparenten Fügepartner

In den bisherigen Simulationen wurde als transparenter Fügepartner reines PC betrachtet. Durch den Einsatz von PC/ABS-GF20, kommt es jedoch zu veränderten Materialparametern und es tritt Streuung auf. Durch einen veränderten Anteil von Absorbermaterialien, meist Ruß, kann das Material sowohl als transparenter als auch als opaker Fügepartner genutzt werden

Aus diesem Grund muss die Streuung des transparenten Fügepartners bei der Lösung des inversen Wärmeleitproblems berücksichtigt werden. Dies wird durch Berücksichtigung der Strahltransportgleichung erreicht, welche orts- (\vec{r}) und richtungsabhängig (\vec{s}) ist [3]. Diese lässt sich mit der „Diskrete Ordinate Methode“ [3] diskretisieren, sodass ein System von ortsabhängigen gekoppelten Differentialgleichungen formuliert wird:

$$\vec{s}_m \cdot \vec{\nabla} I_m(\vec{r}) + k_e \cdot I_m(\vec{r}) = \frac{k_s}{4\pi} \cdot \sum_{m'=1}^M I_{m'}(\vec{r}) \cdot \Phi_{mm'} \cdot w_{m'}$$

wobei I_m die Intensität in die diskrete Richtung \vec{s}_m mit dem Gewichtungsfaktor w_m beschreibt, k_e bzw. k_s der Extinktions- bzw. Streukoeffizient und Φ die Phasenfunktion sind, durch welche die Streuung einfließt. Hier wurde die Henyey-Greenstein-Phasenfunktion [4] $\Phi(\theta) = 0,5(1 - g^2)/(1 + g^2 - 2g \cos(\theta))^{1,5}$ gewählt. Der darin enthaltene Anisotropiefaktor g ist abhängig vom Material und bestimmt die Richtung der Streuung. Abhängig vom Material bzw. Anisotropiefaktor sowie der räumlichen Auflösung des inversen Wärmeleitproblems kann die Streuung als eindimensional genähert werden. In diesem Fall beschreibt das Vier-Fluss-Modell diese spezielle Lösung der Strahltransportgleichung [4].

Für die gleiche Temperaturvorgabe wie oben folgt durch Lösen des inversen Wärmeleitproblems die in Abbildung 3 dargestellte Intensitätsverteilung. Diese ist ähnlich zur Verteilung ohne Streuung (maximale relative Abweichung 5%), hat jedoch eine höhere Leistung ($P = 4,5 \text{ W}$ statt $P = 2,5 \text{ W}$).

4 Zusammenfassung und Ausblick

Derzeit werden nahezu ausschließlich Gauß- und Tophat-Intensitätsverteilungen beim Laserdurchstrahlschweißen eingesetzt, wodurch quer zur Vorschubrichtung keine homogene Temperaturverteilung und damit keine homogene Schweißnaht

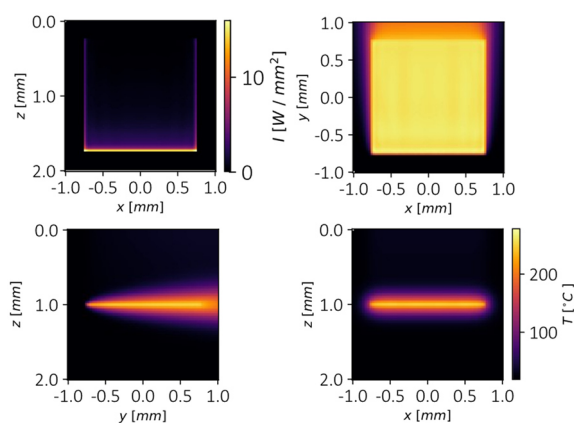


Abb. 3 Optimierte Intensitätsverteilung (links oben) für eine homogene Temperaturverteilung von 260°C und resultierende Temperaturverteilung in der Fügeebene (rechts oben) sowie im x- und y- Querschnitt (unten) unter Berücksichtigung der Streuung für PC/ABS-GF20.

entsteht. Durch Lösen des inversen Wärmeleitproblems und Berücksichtigung von Streuung können prozessangepasste Intensitätsverteilungen erzielt werden, die homogene Temperaturverteilung in der Fügeebene ermöglichen.

Die angepassten Intensitätsverteilungen sollen in naher Zukunft im Experiment durch einen Flüssigkristall-Lichtmodulator oder Freiformoptiken umgesetzt und validiert werden. Zusätzlich werden auch angepasste Intensitätsverteilungen für variierende Prozessparameter (insbesondere Vorschubrichtung und -geschwindigkeit) ermittelt und validiert.

Das Projekt 22.124N wird durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Literatur

- [1] M. Aden, „Influence of the laser-beam distribution on the seam dimensions for laser-transmission welding: a simulative approach“ in Lasers in Manufacturing and Materials Processing (2016), S. 100-110.
- [2] A. Völl, „Methodik zur Ermittlung und Realisierung anwendungsangepasster Intensitätsverteilungen für die Werkstoffbearbeitung mit Laserstrahlung“ (RWTH Aachen University, Diss., 2020).
- [3] J. Zhao, L. Liu, „Radiative Transfer Equation and Solutions“ in Handbook of Thermal Science and Engineering (Springer International Publishing, 2018), S. 933-978.
- [4] A. Ichimaru, „A. Wave Propagation and Scattering in Random Media“ (Academic Press, 1978).