

Angepasste Intensitätsverteilungen in der Lasermaterialbearbeitung

von

Marcus Poppe

CES-Seminararbeit

14.06.2017

angefertigt am

Lehrstuhl für Technologie optischer Systeme der RWTH Aachen

Prof. Dr. rer. nat. P. Loosen

Inhalt

1	Motivation	1
2	Simulationsansatz: Inverses Wärmeleitungsproblem	2
3	Einsatz des Simulationstools für einen Anwendungsfall	6
4	Zusammenfassung und Ausblick	11
5	Literaturverzeichnis	12

1 Motivation

Die Bearbeitung von Werkstoffen mit Laserstrahlung ist in zahlreichen industriellen Branchen etabliert. Bekannte Verfahren sind das Schneiden, Fügen, Umschmelzen, Mikrostrukturierung sowie Oberflächenhärtung [1].

Viele der Anwendungen erfordern eine hohe Präzision der Prozessgrößen. Soll z.B. ein Werkstück flächig für eine Materialumwandlung auf die Bearbeitungstemperatur gebracht werden, ist eine gleichmäßige Erwärmung der Oberfläche anzustreben. Regulär zum Einsatz kommende Laser mit einem Gauß- oder Tophatprofil haben allerdings charakteristische Intensitätsverteilungen, die aufgrund ihrer Form für die anwendungsspezifisch angepasste Bearbeitung von Materialien oftmals ungeeignet sind. Grund hierfür ist die aus den Intensitätsprofilen resultierende lokale Temperaturverteilung auf dem Werkstück. Im Zentrum der Spur wird das Werkstück heißer als am Rand, was eine Überlappung der Bearbeitungsspuren nötig machen kann. Auch eine Überschreitung der Zieltemperatur im Zentrum kann daraus resultieren. Mögliche Folgen dieser nicht optimalen Bearbeitung sind eine ungleichmäßige Oberflächenstruktur, Spannungen im Material und die lokale Schwächung oder gar Zerstörung des Materials [2].

Gesucht ist also eine prozessabhängige Intensitätsverteilung des Laserstrahls auf der Werkstückoberfläche, die an die Aufgabe angepasst wird. Der in diesem Dokument vorgestellte Ansatz, der am Lehrstuhl für Technologie Optischer Systeme (TOS) in Kooperation mit dem Fraunhofer ILT entwickelt wurde und in [3] beschrieben ist, nutzt die numerische Lösung des inversen Wärmeleitungsproblems. Unter Verwendung der Ergebnisse kann ein Vorschlag für das zu nutzende Intensitätsprofil formuliert werden. Zielgröße ist dabei eine vorgegebene Temperaturverteilung des Bereichs nahe der Werkstückoberfläche. In dieser Arbeit wird das mathematische Vorgehen im Simulationscode erläutert und dessen Funktionalität anhand eines Beispielsproblems untersucht. Die Simulation berücksichtigt neben sämtlichen thermophysikalischen Materialparametern die Bearbeitungsgeschwindigkeit und die erforderliche Gesamtleistung des Lasers, sodass auch diesbezügliche Anforderungen an den Prozess vor einem Versuch im Labor optimiert werden können. Um die so bestimmten Intensitätsprofile zu erzielen gewährleisten Freiformoptiken hohe Flexibilität bei der Formung des Strahlprofils.

2 Simulationsansatz: Inverses Wärmeleitungsproblem

Zu einer vorgegebenen Temperaturverteilung an einer Werkstückoberfläche soll die zugehörige Intensitätsverteilung eines einstrahlenden Laserspots bestimmt werden. Der hier genutzte Simulationsansatz für die numerische Bestimmung einer solchen Intensitätsverteilung ist das inverse Wärmeleitungsproblem.

Ausgehend von einer anfänglichen Schätzung des Intensitätsprofils wird die optimale Intensitätsverteilung in einem mehrschrittigen Verfahren iterativ angenähert. Das Vorgehen erfordert dabei die Lösung von drei partiellen Differentialgleichungen. Die hier vorgestellte Vorgehensweise entspricht der mathematischen Implementierung im untersuchten Simulationstool und orientiert sich an den von Özisik [4] vorgestellten Ansätzen zur Lösung verschiedener inverser Wärmeleitungsprobleme.

Die Zielfunktion

Ziel der numerischen Lösung der Problemstellung ist die Ermittlung einer Intensität I , durch deren Einfluss sich auf einem diskreten Gitter mit N Einträgen eine vorgegebene Temperaturverteilung ausbildet.

Hieraus ergibt sich das Minimierungsproblem nach dem Diskrepanzprinzip [5]

$$2.1 \quad S = \min_T \sum_{i=1}^N (T_i - Y_i)^2,$$

bei dem Y_i die vorgegebene Zieltemperatur an den diskreten betrachteten Punkten (x_i, y_i, z_i) beschreibt und T_i die im aktuellen Iterationsschritt vorliegende Temperatur an dieser Position repräsentiert. Deren Differenz wird im Sinne der kleinsten Fehlerquadrate minimiert.

Direktes Problem: Die Wärmeleitungsgleichung

Die erste zu lösende Differentialgleichung ist die Wärmeleitungsgleichung, die die Form

$$2.2 \quad -\nabla(\kappa \nabla T) = -\vec{v} \rho c \nabla T$$

hat, wobei κ die Wärmeleitfähigkeit, \vec{v} die konstante Vorschubgeschwindigkeit, ρ die Dichte des Materials und c die spezifische Wärmeleitfähigkeit beschreibt. Die Temperatur T ist zudem über die Neumann Randbedingung $-\kappa \vec{n} \nabla T = AI$ mit

der Intensität I , die durch den Absorptionsgrad A skaliert wird, verknüpft. Somit besitzt die Wärmeleitungsgleichung lediglich über die Vorschubgeschwindigkeit des Werkstücks eine zeitliche Abhängigkeit. Durch die Lösung von **2.2** kann die momentane Werkstücktemperatur an der Oberfläche für eine gegebene Laserstrahlintensität bestimmt werden.

Die Methode der konjugierten Gradienten

Die Aktualisierung der Laserstrahlintensität wird unter Nutzung der Methode der konjugierten Gradienten mit adjungiertem Problem durchgeführt. Ausgehend von einem anfänglichen Schätzwert I^0 ergibt sich die Aktualisierungsformel zu

$$2.3 \quad I^{n+1} = I^n - \beta^n d^n,$$

wobei β^n die Schrittweite steuert und d^n den konjugierten Gradienten beinhaltet. d^n verknüpft (= konjugiert) den Gradienten ∇S (vgl. **2.1**) im aktuellen Iterationsschritt mit dem Update des vorherigen Schritts d^{n-1} nach dem Schema

$$2.4 \quad d^n = \nabla S(I^n) + \gamma^n d^{n-1}.$$

Hierbei ist γ^n der Konjugationskoeffizient, der über das Polak-Ribière Schema [4] aus ∇S^n und ∇S^{n-1} berechnet wird. Das konjugierte Gradientenverfahren zeichnet sich dadurch aus, dass es eine mit der Anzahl der Schritte zunehmende Konvergenzrate besitzt [6]. Es erfordert jedoch einen rechnerischen Mehraufwand gegenüber dem gewöhnlichen Gradientenverfahren in Form von **2.4** und hat kein direktes Abbruchkriterium [4]. Diese zusätzlichen Aufwendungen sind für den hier betrachteten Fall sinnvoll, da in jedem Iterationsschritt mehrere partielle Differentialgleichungen gelöst werden müssen und somit eine geringe Zahl der Gesamtschritte anzustreben ist. Ein Abbruchkriterium ist nach Bestimmung von I^{n+1} durch Limitierung des Zielfunktionswertes aus **2.1** gegeben.

Das Sensitivitätsproblem

Das konjugierte Gradientenverfahren benötigt ∇S . Ein Ansatz zur Bestimmung dieser Größe ist eine Sensitivitätsanalyse von Gleichung **2.2**, bei der die Auswirkung einer Perturbation der Intensitätsverteilung δI auf das Temperaturprofil T untersucht wird. Es ergibt sich das Sensitivitätsproblem

$$2.5 \quad -\nabla(\nabla(\kappa(T)\delta T)) = -\vec{v}\nabla\left(\left(\rho(T)c(T) + \rho(T)\frac{\partial c}{\partial T}T + c(T)\frac{\partial \rho}{\partial T}T\right)\delta T\right)$$

mit Neumann-Randbedingung $-\vec{n}\nabla(\kappa(T)\delta T) = A\delta I$ und Dirichlet-Randbedingung $\partial T = 0$ auf der Werkstückoberfläche. Dies ist die zweite partielle Differentialgleichung, welche für das adjungierte Problem gelöst werden muss.

Das adjungierte Problem

Die bedingte Minimierung der Zielfunktion lässt sich mithilfe eines Lagrange Multiplikators λ formulieren. Hierzu werden **2.1** und **2.2** folgendermaßen verknüpft:

$$2.6 \quad S = \sum_{i=1}^N (T_i - Y_i)^2 + \int_V \lambda(x, y, z) (-\nabla(\kappa(T)\nabla T) + \vec{v}\nabla(\rho(T)c(T)T)) dV.$$

Mit **2.5** und **2.6** erhält man unter Verwendung der Randbedingungen das adjungierte Problem

$$2.7 \quad \begin{aligned} -\kappa\nabla(\nabla\lambda) &= -2 \sum_i (T_i - Y_i)\delta(x - x_i)\delta(y - y_i)\delta(z - z_i) \\ &\quad - \vec{v}\nabla\left(\rho c + \rho\frac{\partial c}{\partial T}T + c\frac{\partial \rho}{\partial T}T\right)\nabla\lambda \end{aligned}$$

mit Dirac-Delta Funktion $\delta(\cdot)$ und Randbedingung $\vec{n}\vec{v}\nabla(\rho c + \rho\frac{\partial c}{\partial T}T + c\frac{\partial \rho}{\partial T}T)\lambda - \vec{n}\kappa\nabla\lambda = 0$. Hiermit ergibt sich ∇S zu

$$2.8 \quad \nabla S_j = \int_{\partial\Omega_N[I_j]} \lambda A d\Omega.$$

$\partial\Omega_N[I_j]$ bezeichnet den Teil des Randes, auf den I_j einwirkt. Die vorgestellten Differentialgleichungen werden in jedem Iterationsschritt für das Update des Intensitätswertes benötigt.

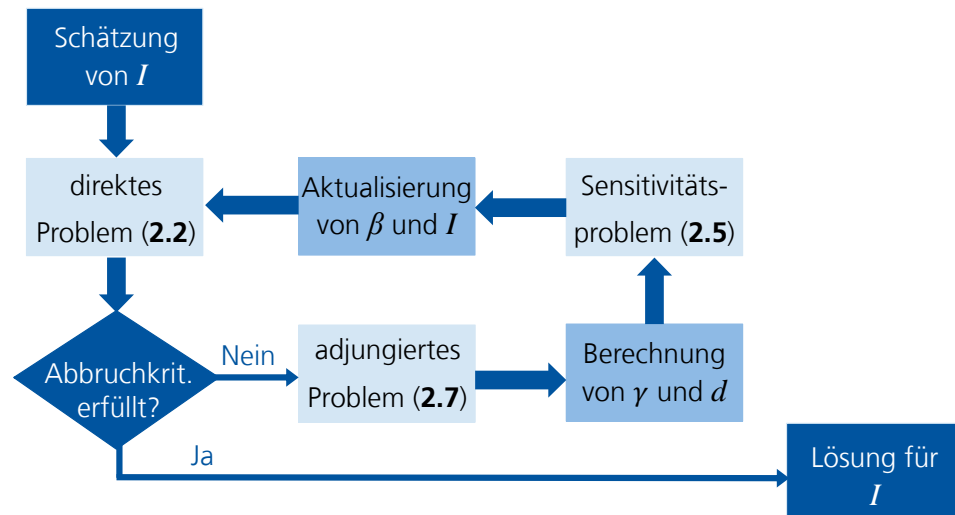
Schrittfolge im Simulationstool

Bild 1 zeigt den Ablauf des iterativen Löser. Auf Grundlage eines geschätzten Ausgangswertes für die Intensitätsverteilung I wird das direkte Problem zur Bestimmung der Temperaturverteilung gelöst. Ist das Iterationsmaximum noch nicht erreicht und der Zielwert der Temperaturabweichung nicht unterschritten, wird das adjungierte Problem gelöst, auf dessen Grundlage γ^n und d^n bestimmt werden. Im Anschluss daran wird das Sensitivitätsproblem gelöst, das das für die Bestimmung von β^n erforderliche δT liefert. Schließlich kann daraus eine neue Schätzung für I^{n+1} gegeben werden. Sobald bei diesem Vorgehen eins der definierten Abbruchkriterien erfüllt wird, liegt ein ausreichend genaues Ergebnis für die Intensitätsverteilung vor. Die für die in Abschnitt 4 genutzten Abbruchkriterien sind die relative Änderung in S zwischen zwei Schritten von

maximal $1 \cdot 10^{-5}$ sowie eine maximale Iterationszahl der Lösungsschritte des inversen Problems von 15.

Bild 1

Abfolge der Einzelschritte im iterativen Lösungsverfahren nach Völl et al. [3]



Eigenschaften der Implementierung

Der Simulationscode, mit dem die Lösung des inversen Wärmeleitungsproblems wie in Bild 1 dargestellt ermittelt wird, ist in der Programmiersprache C++ geschrieben und nutzt die FEM-Programmbibliothek deal.II [7]. Entsprechende Funktionen zur Erstellung eines Finite Elemente Gitters, zur Erfassung des Dünnbesetztheitsmusters der Lösungsmatrix sowie zur Gauß-Integration, werden durch die Bibliothek geliefert. Bei der Ausführung des Simulationscodes besteht die Möglichkeit, zwischen einer Berechnung auf Grundlage von Finiten Differenzen oder Finiten Elementen zu wählen. Die Ausdehnung der betrachteten Fläche, die Auflösung der Diskretisierung sowie die Vorschubgeschwindigkeit und Materialparameter lassen sich anwendungsspezifisch anpassen.

3 Einsatz des Simulationstools für einen Anwendungsfall

Im Folgenden wird das am TOS entwickelte Simulationstool für die Untersuchung eines konkreten Anwendungsfalls mit vorgegebenen Materialdaten und Prozessparametern angewendet.

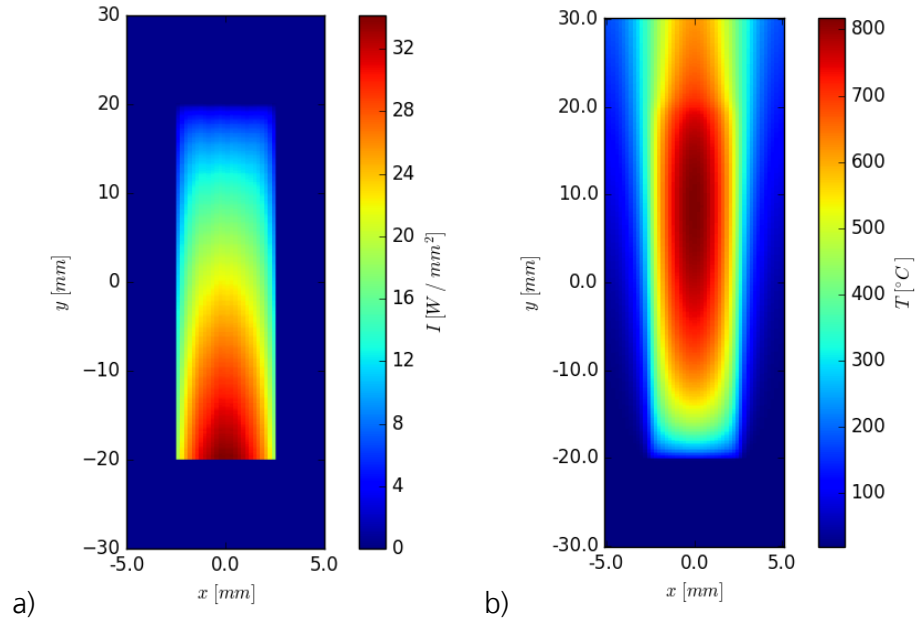
Ausgegangen wird von einem in x - y Ebene unendlich ausgedehnten Blech mit einer Dicke von 1,5 mm. Die Spotgröße, für die eine optimale Intensitätsverteilung bestimmt werden soll, beträgt 5 mm x 40 mm. Bei der Simulation wird die Wärmestrahlung vernachlässigt und es wird eine gleichmäßige Bewegung des Werkstücks bei der Bestrahlung festgelegt (\vec{v} konstant). Ziel der Bearbeitung ist es, das Blech im Spot gleichmäßig auf 700 °C auf der Ober- und Unterseite zu erwärmen, um eine optimale Materialumwandlung zu erzielen. Dabei soll eine möglichst hohe Bearbeitungsgeschwindigkeit erreicht werden, für die eine maximale Gesamtleistung des Lasers von 6 kW bereitgestellt werden kann.

Im Folgenden wird die Simulation bei einer Überfahrtgeschwindigkeit von $\vec{v} = 0,14 \text{ m/s}$ untersucht. Diese Geschwindigkeit zeichnet sich dadurch aus, dass sowohl eine hohe Prozessgeschwindigkeit als auch das Erreichen einer ausreichend hohen Temperatur an der Werkstückunterseite gewährleistet werden. Die Betrachtung der Ergebnisse nach verschiedenen Iterationsschritten macht die schrittweise Annäherung an die zu erzielende Temperaturverteilung deutlich. Hierbei werden jeweils Intensitätsverteilung und das daraus folgende Temperaturfeld an der Werkstückoberfläche verglichen.

Bild 2 a) zeigt das Intensitätsprofil nach einem Iterationsschritt. Entlang der x -Achse besitzt das Intensitätsprofil eine ähnliche Charakteristik wie ein Gaußstrahl. Dementsprechend ist auch im Temperaturfeld der Werkstückoberseite b) eine ungleichmäßige Erwärmung der Oberfläche zu erkennen, bei der die zu erreichende Temperatur deutlich überschritten wird. Der Ursprung liegt im Zentrum der Strahlachse; das Blech führt also eine Relativbewegung unter dem Strahl hinweg aus. Aus diesem Grund liegt die Temperatur auch nach der Überfahrt deutlich über der Umgebungstemperatur.

Bild 2

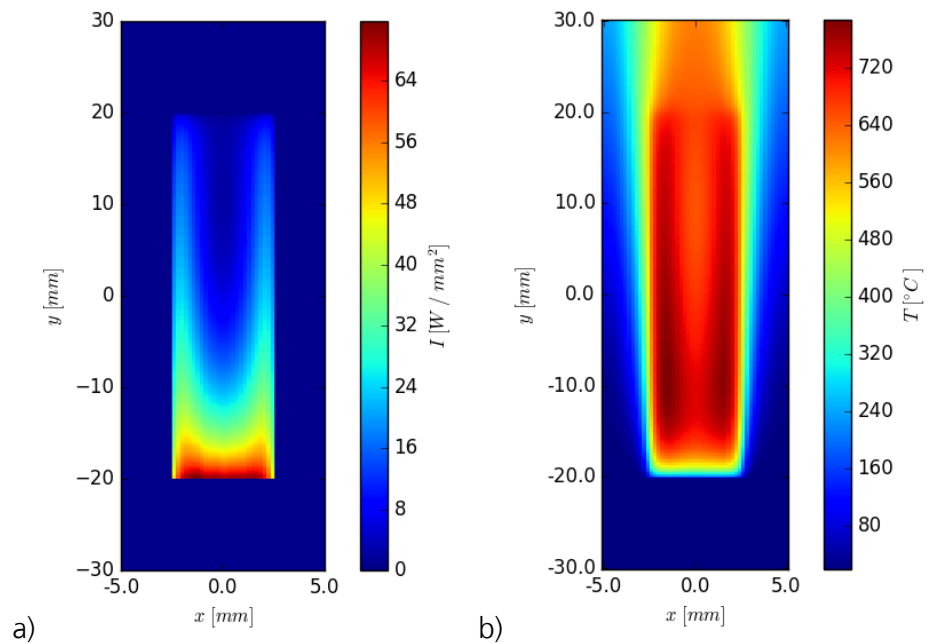
Simulierte Werte für Intensitäts- (a) und Temperaturverteilung (b) nach einem Iterationsschritt



Bereits nach drei Iterationsschritten ist eine gleichmäßigere Temperaturverteilung an der Werkstückoberfläche ersichtlicher. Die Intensitätsverteilung in Bild 3 a) zeigt ein U-förmiges Profil, wobei die maximale Intensität nur in einem kleinen Bereich auftritt. In der Temperaturverteilung ist immer noch eine flächige Überschreitung des Zielwertes vorhanden.

Bild 3

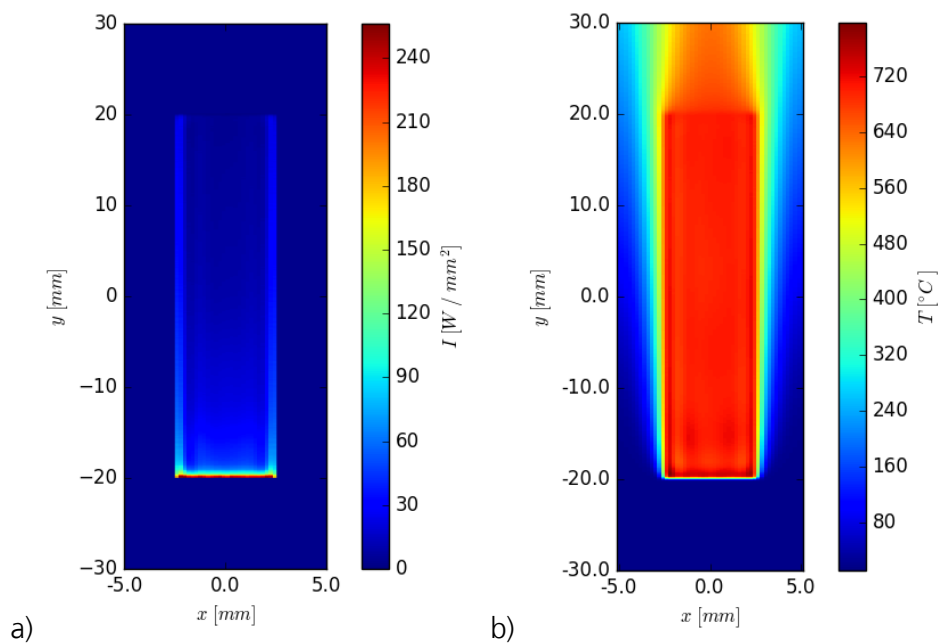
Simulierte Werte für Intensitäts- (a) und Temperaturverteilung (b) nach drei Iterationsschritten



Nach 15 Iterationsschritten erreicht die Temperaturverteilung ein sehr gleichmäßiges Ergebnis an der Oberfläche, das innerhalb des bestrahlten Bereichs nur geringfügig von der Vorgabe abweicht. Diesem liegt eine Intensitätsverteilung zugrunde, bei der lediglich ein Linienprofil bestrahlt wird, das zum Rand hin in x -Richtung sehr abrupt und in y -Richtung über die gesamte Ausdehnung des bestrahlten Bereichs abfällt. Hierdurch kann ein sehr viel präziserer Temperaturabfall an der Grenze zwischen bestrahltem Profil und Umgebung erzielt werden als bei der Nutzung herkömmlicher Strahlprofile.

Bild 4

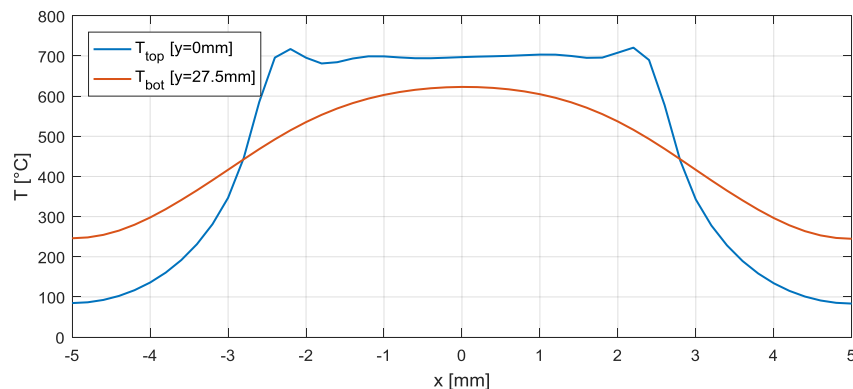
Simulierte Werte für
Intensitäts- (a) und
Temperatur-
verteilung (b) nach
15 Iterationsschritten



Die Integration der Intensität über die Fläche in den drei betrachteten Fällen liefert Werte von 3860 W für einen Iterationsschritt, 4350 W für drei Iterationsschritte und 4600 W für 15 Iterationsschritte, womit die Vorgabe einer maximal verfügbaren Leistung von 6000 W erfüllt wird.

Bild 5

Temperaturverlauf
an der Oberseite
(blau) und Unterseite
(orange) in x -
Richtung für eine
Geschwindigkeit von
0,14 m/s

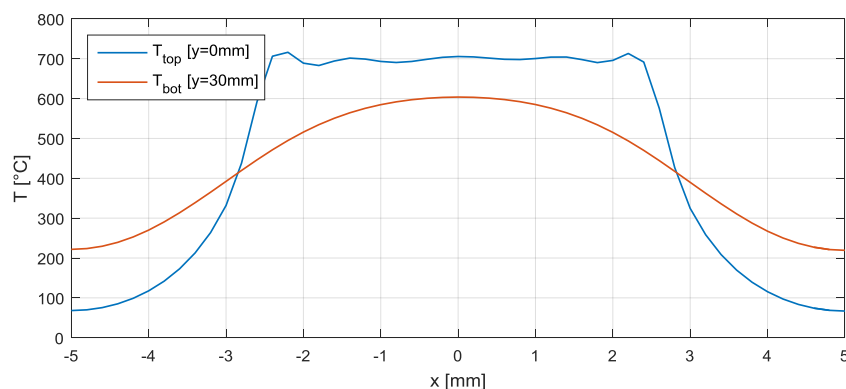


Ziel des simulierten Bearbeitungsvorgangs ist es, das Blech auch in der Tiefe möglichst gleichmäßig auf die Zieltemperatur zu erwärmen. Bild 5 zeigt den Temperaturverlauf an der Oberfläche bei $y = 0 \text{ mm}$ und an der Position der stärksten Erwärmung an der Unterseite. Es ist erkennbar, dass die Temperatur auf der Oberseite nahezu im gesamten betrachteten Bereich den Zielwert genau erfüllt, während auf der Unterseite mit 623 °C eine Abweichung von 11 % vorliegt. Die Wärmeleitung, die jegliche Erwärmung des Blechs im Profil und an der Unterseite bedingt, bewirkt auch Erwärmung des Materials seitlich des Profils. Die Position der höchsten Temperatur tritt mit $y = 27.5 \text{ mm}$ erst hinter dem Bearbeitungsstrahl auf. Die Kurve der Temperaturverteilung an dieser y -Position besitzt aufgrund der bis zu diesem Zeitpunkt erfolgten Wärmeleitung ein sehr viel flacheres Profil, das eine Abgrenzung des Zielbereichs zur Umgebung erschwert.

Ein Ansatz zur Modifizierung des Bearbeitungsvorgangs wäre eine Veränderung der Vorschubgeschwindigkeit. Dadurch würde die momentan eingekoppelte Leistung verändert. Weitere Simulationen zeigen, dass ein Erreichen der Zieltemperatur an der Oberfläche für alle untersuchten Geschwindigkeiten möglich bleibt.

Bild 6

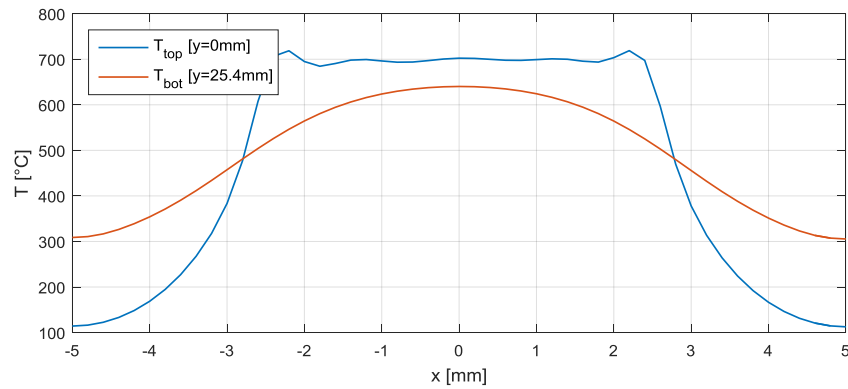
Temperaturverlauf an der Oberseite (blau) und Unterseite (orange) in x -Richtung für eine Geschwindigkeit von $0,165 \text{ m/s}$



Die maximal verfügbare Leistung wäre bei einer Erhöhung der Geschwindigkeit auf $\vec{v} = 0,165 \text{ m/s}$ mit 5121 W immer noch ausreichend. Gleichzeitig würde dies jedoch zu einer stärkeren thermischen Beanspruchung der Oberseite führen und die Unterseite des Werkstücks wurde lediglich auf eine Temperatur von 604 °C erwärmt (Bild 6).

Bild 7

Temperaturverlauf
an der Oberseite
(blau) und Unterseite
(orange) in x-
Richtung für eine
Geschwindigkeit von
0,115 m/s



Bei einer Verlangsamung auf $\vec{v} = 0,115 \text{ m/s}$ sinkt die notwendige Leistung auf 4091 W und die maximale Temperatur an der Unterseite steigt auf 640 °C (Bild 7). Abhängig davon, ob bei der Bearbeitung die Einhaltung der Temperaturvorgabe an der Ober- und Unterseite oder die Bearbeitungsgeschwindigkeit als wichtiger eingestuft wird, kann der Prozess entsprechend angepasst werden.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel der Untersuchung ist die Bestimmung einer Laserstrahl-Intensitätsverteilung, um ein vorgegebenes Temperaturprofil auf einem Werkstück einzustellen. Hierzu wird das inverse Wärmeleitungsproblem als Ansatz genommen und das von Völl et al. [3] genutzte Verfahren zur iterativen Lösung vorgestellt. Dieses liegt als in C++ programmierter Simulationscode vor, mit dem das in Abschnitt 3 vorgestellte Beispielproblem simuliert und analysiert wurde. Die so ermittelten Ergebnisse liefern Richtwerte zur Wahl der Vorschubgeschwindigkeit und der notwendigen Laserleistung. Für eine Geschwindigkeit von $0,14 \text{ m/s}$ kann die Temperaturvorgabe an der Werkstückoberseite bis auf eine durchschnittliche Abweichung von weniger als einem Prozent erfüllt werden, wohingegen die Zieltemperatur an der Unterseite nur zu maximal 89% erreicht wird. Ursache dieses Resultats ist, dass die Temperatur der Unterseite lediglich durch Leitung der an der Oberfläche induzierten Wärme im Material hervorgerufen wird.

Die Annahmen für die Untersuchung des hier betrachteten Werkstücks vernachlässigen die Wärmestrahlung an den Werkstoffoberflächen. Bei Bauteilen mit endlichen Dicken kann eine Untersuchung der Wärmestrahlung sinnvoll sein. Da es sich im hier betrachteten Fall um einen stationären Prozess handelt, könnte eine derartige Analyse nach Abschluss der Simulation der Wärmeleitung durchgeführt werden. Durch Einsatz geeigneter Reflektoren könnte mit den so erhaltenen Daten auf der Unterseite eine potentiell gleichmäßigere Temperaturverteilung erzielt werden.

Die Simulation kann an weitere Anwendungsspezifikationen wie zum Beispiel die schrittweise Aufheizung empfindlicher Materialien angepasst werden, zu denen im betrachteten Fall keine Vorgabe vorliegt.

5 Literaturverzeichnis

- [1] Fraunhofer ILT, *Wärmebehandlung mit Laserstrahlung*. Verfügbar unter: http://www.ilt.fraunhofer.de/content/dam/ilt/de/documents/Leistungsangebote/lasermaterialbearbeitung/TB_Waermebehandlung_mit_Laserstrahlung_2009.pdf (abgerufen am 02.06.2017).
- [2] ASM International Handbook Committee, *Heat treating*, 1. print, 1991.
- [3] A. Völl, J. Stollenwerk und P. Loosen, „Computing specific intensity distributions for laser material processing by solving an inverse heat conduction problem“ in : SPIE (2016), 974105.
- [4] M. N. Özisik, H. R. Orlande und A. J. Kassab, „Inverse Heat Transfer: Fundamentals and Applications“, *Appl. Mech. Rev.* **55**(1), B18 (2002).
- [5] Arnold Reusken, *An Introduction to Inverse Problems: Model-based Estimation Methods - Lecture Notes*, 2014.
- [6] W. Dahmen und A. Reusken, *Numerik für Ingenieure und Naturwissenschaftler*. Berlin u.a.: Springer, 2006.
- [7] W. Bangerth, R. Hartmann und G. Kanschat, „deal.II - A general-purpose object-oriented finite element library“, *ACM Trans. Math. Softw.* **33**(4), 24-es (2007).