

SIMULATIONSGESTÜTZTE ANALYSE DES ÜBERGANGS ZWISCHEN LASER- STRAHLSCHWEIßEN UND - ABTRAGSSCHNEIDEN

Andreas Otto¹, Robby Ebert²

¹Institut für Fertigungstechnik und Hochleistungslasertechnik, TU Wien,
Getreidemarkt 9, 1060 Wien, Österreich

²Laserinstitut Hochschule Mittweida, Technikumplatz 17, 09648 Mittweida, Deutschland

Das Laserstrahlabtragsschneiden ist ein Remote-Schneidverfahren, bei dem die Schmelze im Bereich der Wechselwirkungszone zwischen Laserstrahl und Werkstück aufgrund der laserinduzierten Verdampfung so stark beschleunigt wird, dass sie ohne zusätzliche Gasströmung aus dem Werkstück herausgeschleudert wird. Dieser Prozess findet bei hohen Laserstrahlintensitäten und Vorschubgeschwindigkeiten statt. Wird eine bestimmte minimale Vorschubgeschwindigkeit unterschritten, verbleibt die Schmelze im Werkstück und der Prozess geht in einen Tiefschweißprozess über. Im vorliegenden Beitrag werden die zugrundeliegenden fluiddynamischen Mechanismen mit Hilfe eines multiphysikalischen Simulationsmodells analysiert. Zudem werden die Simulationsergebnisse mit experimentellen Ergebnissen sowohl qualitativ als auch quantitativ verglichen.

Laser ablation cutting is a remote cutting process where the melt in the interaction zone between laser and work piece is strongly accelerated due to laser-induced evaporation. Thus the melt is ejected without an additional gas jet. This process takes place at high laser intensities coupled with high feed rates. Below a certain minimal feed rate the melt remains within the work piece and the process transitions into deep penetration welding. Within this contribution the underlying fluid dynamical mechanisms will be analysed by means of a multi-physical simulation model. Additionally simulation results and experimental results will be compared both qualitatively and quantitatively

1. Einleitung

Die in dieser Veröffentlichung dargestellten Ergebnisse resultieren aus einer Studie, die vom Laserinstitut Hochschule Mittweida und dem Institut für Fertigungstechnik und Hochleistungslasertechnik an der TU Wien gemeinsam durchgeführt wurde. Die experimentellen Untersuchungen wurden in Mittweida durchgeführt, die Simulationen und deren Analyse an der TU Wien.

Im Folgenden werden zunächst die experimentellen Randbedingungen und das verwendete Simulationsmodell kurz dargestellt.

2. Experimentelle Durchführung

Für die experimentellen Untersuchungen wurde ein Monomode-Faserlaser der Firma IPG in Verbindung mit einem Hochaperturscanner-Scanner der Fa. Raylase mit einer Brennweite von 250 mm eingesetzt. Aufgrund der exzellenten Strahlqualität des Lasers ($M^2 < 1.07$) wurde damit ein Fokusbereich von 25 μm erzielt.

Für die Untersuchungen wurden die Laserleistung auf der Werkstückoberfläche zwischen 500 W und 2.500 W variiert, die Scangeschwindigkeit zwischen 1 m/s und 15 m/s. Als Werkstoff wurde Stahl 1.4301 mit einer Blechdicke von 1 mm eingesetzt. Die Experimente wurden unter Normalatmosphäre durchgeführt und pro Probe wurde eine Überfahrt mit dem Laser appliziert.

Für die im Folgenden dargestellten Ergebnisse wurde die Scangeschwindigkeit im oben genannten Rahmen bei einer Laserleistung von 1.000 W variiert (siehe Bild 1).

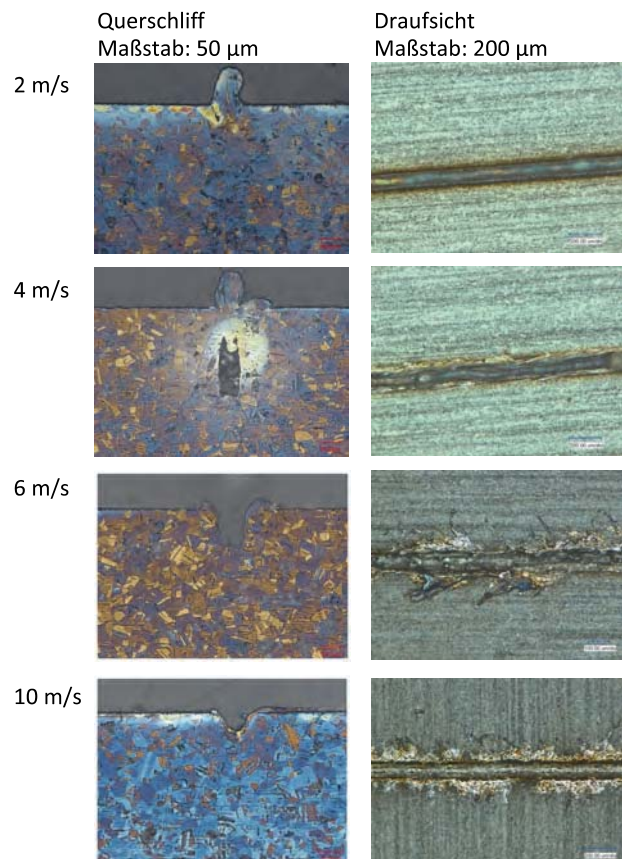


Bild 1: Exemplarische Bearbeitungsergebnisse bei Variation der Scangeschwindigkeit, Laserleistung (86% Leistungseinschluss) 1.000 W

Prinzipiell konnten hier folgende Beobachtungen gemacht werden:

- bei 1 m/s Durchschweißung des gesamten Bleches (Dicke 1 mm).
- bei 2 m/s Verringerung der Schweißtiefe auf ca. 600 µm.
- bei 3 m/s Beginn der Bildung eines Hohlraumes am Boden der Einschweißung bei weiterer Verringerung der Schweißtiefe.
- bei 4 m/s weiterhin Ausbildung des Hohlraumes (evtl. Vergrößerung des Hohlraumes) und weiterer Verringerung der Schweißtiefe.
- bei 5 m/s ausschließlich Abtrag - vereinzelt mit Schmelze, die die Schnittfuge verschließt.
- ab 6 m/s Abtrag - die Abtragtiefe verringert sich mit weiter steigender Scangeschwindigkeit.

Prinzipiell konnten also drei verschiedene Bearbeitungsregime unterschieden werden: Bei niedrigen Scangeschwindigkeiten lag ein reiner Schweißprozess vor. Bei hohem Vorschub wurde ein Abtragsprozess beobachtet. Dazwischen lag ein Übergangsbereich, in dem sich am Bearbeitungsgrund ein Hohlraum ausbildete.

Zur weiteren Analyse wurde der Prozess mit einer Hochgeschwindigkeitskamera beobachtet. Bild 2 zeigt wieder exemplarische Ergebnisse dieser Untersuchungen mit jeweils zwei unterschiedlichen Blickwinkeln auf die sich ausbildende Plasmafackel.

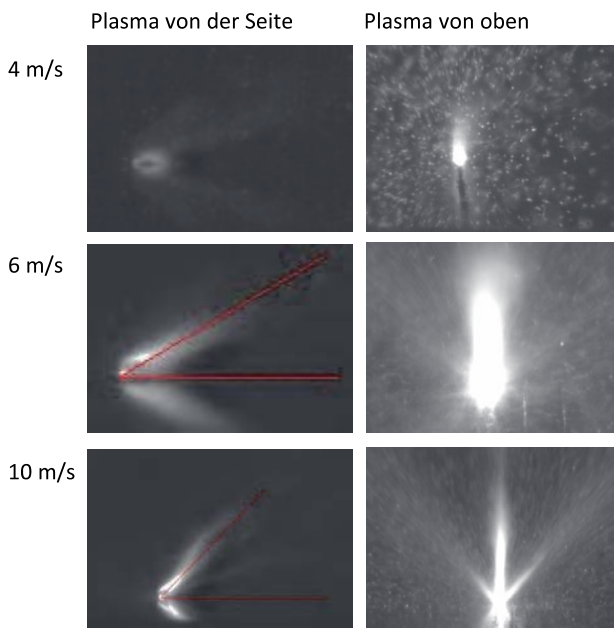


Bild 2: Hochgeschwindigkeitsaufnahmen des Bearbeitungsprozesses bei Variation der Scangeschwindigkeit

In der linken Spalte in Bild 2 wurde der Prozess von der Seite, quer zur Scanrichtung beobachtet. Bei der Interpretation dieser Aufnahmen ist zu beachten, dass man neben der eigentlichen Leuchterscheinung auch deren Spiegel an der Werkstückoberfläche sieht. Zur Verdeutlichung sind hier die Werkstückoberfläche sowie die Austrittsrichtung rot markiert.

Folgende prinzipiellen Beobachtungen wurden bei seitlicher Beobachtung der Leuchtemissionen gemacht:

- bei geringer Scangeschwindigkeit keine ausgeprägte Plasmafackel.
- bei 5 m/s schwankende Ausbildung der Fackel - bei stärkerer Ausprägung flacher Austriebswinkel.
- ab 6 m/s starke Ausprägung der Fackel - der Austriebswinkel stieg mit zunehmender Scangeschwindigkeit.

Die rechte Spalte in Bild 2 zeigt exemplarische Aufnahmen der Plasmafackel bei Beobachtung von oben. Hier wurden im untersuchten Parameterbereich folgende Beobachtungen gemacht:

- bei 1 m/s kleine kugelige Fackel.
- 2 und 3 m/s kleine Fackel geringer Intensität – von 2 auf 3 m/s langsam größer werdend – kein Austrieb von Partikeln erkennbar.
- bei 4 m/s höhere Intensität mit starkem Austrieb großer Partikel.
- bei 5 m/s Vergrößerung der Plasmafackel - Abnahme der Anzahl großer Partikel und Zunahme kleiner Partikel.
- bei 8 m/s deutliche Ausbildung zweier seitlicher Jets symmetrisch zur Hauptfackel – keine konstante Ausbildung über die gesamte Bearbeitungslänge – Hauptfackel konstant ausgeprägt – vermutlich kaum Veränderung der Partikelgröße im Vergleich zu 6 m/s.
- bei 10 m/s Verringerung des Winkels der seitlichen Jets – Intensität des Jets fluktuiert – vermutlich kaum Veränderung der Partikelgröße im Vergleich zu 6 m/s.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass

- im Schweißregime die Leuchtemissionen nur schwach ausgeprägt waren und kein Partikelaustrieb beobachtet wurde.
- im Übergangsbereich die Leuchtemissionen zunahm. Gleichzeitig setzte ein starker Austrieb von Schmelzetröpfchen ein, deren Größe mit zunehmender Vorschubgeschwindigkeit abnahm.
- im Abtragsbereich sich eine stark gerichtete Leuchtemission ausbildete, deren Winkel zur Werkstoffoberfläche mit zunehmender Scangeschwindigkeit anstieg. Gleichzeitig bildeten sich seitliche Jets aus, deren Winkel zur Scanrichtung mit zunehmender Scangeschwindigkeit abnahmen.

3. Simulationsmodell

Das an der TU Wien entwickelte multiphysikalische Simulationsmodell basiert auf dem OpenSource-Softwarepaket OpenFOAM®. Dieses Programmpaket dient in erster Linie der Simulation fluiddynamischer Vorgänge und löst mit Hilfe des Finiten-Volumen-Ansatzes Systeme von gekoppelten partiellen Differentialgleichungen. Um Prozesse wie das Laserstrahl-Abtragsschneiden oder das Laserstrahlschweißen realitätsnah zu simulieren, wurden eine ganze Reihe physikalischer, miteinander gekoppelter Phänomene in das ursprüngliche Programmpaket implementiert.

So wird die Ausbreitung der Laserstrahlung zum Werkstück mit Hilfe eines kombinierten Ansatzes aus Raytracing und der Lösung einer Diffusionsgleichung berechnet. Die sich während der Laserbearbeitung frei entwickelnde Oberfläche des Werkstücks wird mit Hilfe eines Multiphasen-Volume-of-Fluid-Ansatzes, den OpenFOAM® zur Verfügung stellt, unter Lösung der Navier-Stokes-Gleichung ermittelt. Mit diesem Ansatz kann die zeitliche Entwicklung beliebig vieler unterschiedliche Werkstoffe im Simulationsbereich modelliert werden. Die Phasenübergänge Schmelzen/Erstarren und Verdampfen/Kondensieren werden mit einem neu entwickelten Ansatz modelliert. Dazu wird jedem Aggregatzustand (fest, flüssig, gasförmig) eines Werkstoffes eine eigene Phase im oben genannten Multiphasenansatz zugeordnet. Zudem wird noch eine Phase eingeführt, die das wiedererstartete Material erfasst, um so im Postprocessing z.B. eine einfache Möglichkeit zur Analyse der Schweißnahtgeometrie zu haben. Prinzipiell lassen sich zukünftig mit diesem Ansatz auch metallurgische Fragestellungen lösen. Eine Implementierung steht hier allerdings noch aus.

Jedem der genannten Zustände eines Werkstoffes können in dem Modell eigene temperaturabhängige Werkstoffkennwerte zugeordnet werden. Für die gasförmigen Phasen werden hier oft, z.B. für die Dichte, die Gesetze verwendet, die für ideale Gase gelten. Andere temperaturabhängige Kennwerte werden in Form von Tabellen hinterlegt und zwischen den einzelnen Stützpunkten interpoliert.

Zur Modellierung der Phasenübergänge muss zunächst für jeden Ort im Berechnungsbereich die Menge des Materials berechnet werden, die einen Phasenübergang durchläuft. Im Falle des Schmelzens und Erstarrens wird hierzu die Methode von Voller [1] verwendet. Bei diesem Ansatz ergibt sich das lokale Verhältnis zwischen fester und flüssiger Phase einfach aus der lokal für den Phasenübergang verfügbaren Energiemenge im Verhältnis zur latenten Wärme für diesen Übergang. Für die Verdampfung respektive Kondensation wird die Clausius-Clayperon-Gleichung entsprechend der Beschreibung von Schoonderbeek [2] herangezogen. Dieser Ansatz erfordert eine iterative Lösung, da die Menge des abdampfenden Materials den lokalen Druck maßgeblich bestimmt, dieser aber wiederum in die Clausius-Clayperon-Gleichung eingeht. Zudem wird durch die Phasenübergänge die lokale Temperatur verändert, was auch wieder in dieser Gleichung berücksichtigt werden muss.

Sind die jeweiligen Massenraten für die Phasenübergänge bekannt, so werden die jeweiligen lokalen Phasenanteile entsprechend erhöht oder reduziert. Dabei resultieren z.B. beim Übergang flüssig-fest zunächst Zonen mit stark komprimiertem Gas, deren Expansion mit Hilfe eines eigens entwickelten Ansatzes zur Modellierung kompressibler Strömungen berechnet wird.

Weitere, detailliertere Informationen zum Modell sind in [3] und [4] zu finden.

4. Simulationsergebnisse und deren Analyse

Für die Simulationen wurden die im Experiment vorgelegenen Bearbeitungsparameter verwendet. Lediglich die Blechdicke wurde zur Reduktion des Berechnungsaufwandes von 1 mm auf 0.6 mm reduziert.

Bild 3 zeigt die zeitliche Entwicklung des Schmelzbades bei einer Scangeschwindigkeit von 6 m/s und einer Laserleistung von 1.000 W sowie einem Fokussdurchmesser von 25 μm .

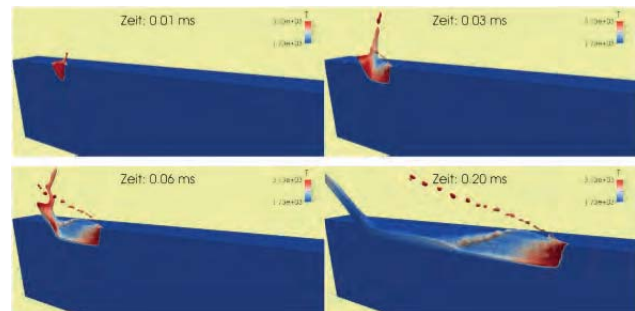


Bild 3: Zeitliche Entwicklung des Schmelzbades bei einer Scangeschwindigkeit von 6 m/s. Farblich kodiert ist der Temperaturbereich zwischen Schmelz- und Verdampfungstemperatur.

Zunächst bildet sich im Bereich der Wechselwirkungszone eine Dampfkapillare aus, die bereits nach wenigen μs ihre maximale Tiefe erreicht hat (oben links in Bild 3). Gleichzeitig entwickelt sich ein Schmelzejet, mit dem das durch den Dampfdruck verdrängte Material aus der Dampfkapillare entweicht. Kurze Zeit später (oben rechts in Bild 3) bildet sich kurz hinter der fortschreitenden Abtragsfront ein Bereich in dem sich eine Schmelztropfenkette von der Werkstückoberfläche löst. Ihren Impuls erhalten die Tropfen zum einen durch den Rückstoß des Metaldampfes an der Abtragsfront und zum anderen durch die Reibungskräfte des schnell abströmenden Dampfes.

Mit weiterem Fortschritt des Prozesses (unten in Bild 3) bilden sich im Werkstück zwei unterschiedliche Hauptschmelzeströmungen aus:

Im Abtragsgrund fließt der Anteil der Schmelze der nicht durch den Rückstoß des Metaldampfes an der Abtragsfront in Richtung der Oberfläche des Werkstücks verdrängt wurde. Im Folgenden wird dieser Anteil als Grundströmung bezeichnet.

Am oberen Rand der Schnittkante fließt der Anteil, der zwar an der Abtragsfront durch den Rückstoß des abdampfenden Materials verdrängt wurde, aber nicht durch den vorbeiströmenden Metaldampf in Form von Tropfen vom Werkstück weggerissen wird. Dieser Strömungsanteil wird hier als Randströmung bezeichnet. Nach einiger Zeit am oberen Rand der Schnittkante bewegt sich die Randströmung wieder in Richtung des Abtragsgrundes. Diese Richtungsänderung kann durch die Oberflächenspannung, die der Bewegung der Schmelze weg von der Oberfläche entgegenwirkt, erklärt werden. Bild 4 zeigt die Auswirkung dieser abwärts gerichteten Strömung auf das Bearbeitungsergebnis.

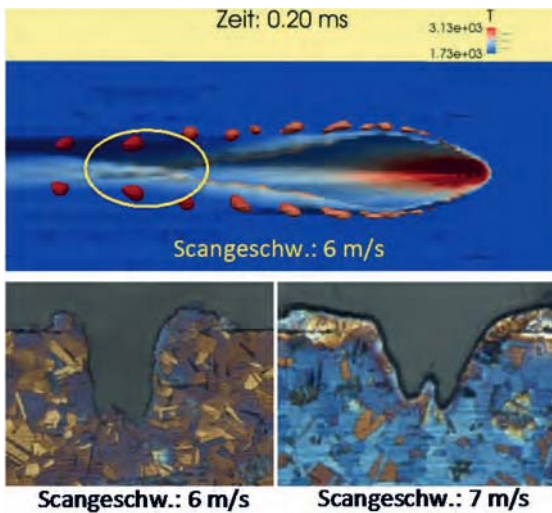


Bild 4: Zur Entstehung des Höckers am Abtragsgrund: Blick von oben auf den Bearbeitungsprozess - Querschliffe zweier Bearbeitungsergebnisse

Im Abtragsgrund treffen die Randströmungen von den beiden Schnittkanten aufeinander und wölben sich auf. Erstarrt diese Schmelzbaderhebung schnell genug, so entstehen die im Bild 4 unten in den Schliffbildern im Abtragsgrund deutlich zu erkennenden Höcker. Bild 5 zeigt, dass sich das Verhältnis zwischen Grund- und Randströmung bei unterschiedlichen Scangeschwindigkeiten deutlich ändert. Bei niedrigen Scangeschwindigkeiten (Bild 5 oben links) ist die Randströmung nur schwach ausgeprägt, und deren Geschwindigkeit ist zu gering, um die Oberflächenspannung zu überwinden und eine Tropfenablösung zu generieren. Der größte Teil des Schmelzetransports um die Dampfkapillare herum erfolgt über die Grundströmung. Zu Beginn des Prozesses erfolgt der Schmelzeaustrieb über den Schmelzejet am Anfang der Bearbeitungsspur. Später verbleibt die Schmelze im Werkstück und ein Schweißprozess findet statt, wie auch im Experiment beobachtet.

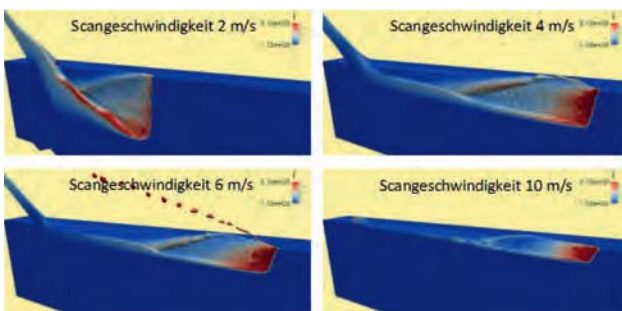


Bild 5: Schmelzbad bei unterschiedlichen Bearbeitungsgeschwindigkeiten. Farblich kodiert ist der Temperaturbereich zwischen Schmelz- und Verdampfungstemperatur.

Bei Erhöhung der Schweißgeschwindigkeit steigt der Anteil der Randströmung im Verhältnis zur Grundströmung (oben rechts in Bild 5). Zunächst hat die Randströmung noch nicht genügend Impuls um die Oberflächenspannung zu überwinden, sondern wird quasi vollständig in die Abtragskerbe zurückgedrängt. Vermutlich vereinigten sich die beiden Randströmungen im Experiment bereits vor Erreichen des

Abtragsgrundes wodurch der in Abschnitt 2 beschriebene Hohlraum entstand. In der Simulation war dieser Effekt nicht erkennbar. Es wird vermutet, dass dies an einem Fehler in der derzeit implementierten Beschreibung der Oberflächenspannung liegt. Weitere Arbeiten hierzu laufen derzeit.

Eine weitere Steigerung der Scangeschwindigkeit führt zu einem zunehmenden Impuls der Randströmung von der Werkstückoberfläche weg und damit zum Austrieb von zunächst großen, mit steigender Geschwindigkeit kleiner werdenden Schmelzetropfen, die in den Simulationsergebnissen nur bei geeigneter Betrachtung erkannt werden können. Dies liegt an der flacher werdenden Abtragsfront, von der der Metaldampf primär senkrecht abströmt. In Bild 2 links ist der Einfluss der Scangeschwindigkeit auf die Abströmrichtung des Metaldampfes deutlich zu erkennen.

Bei sehr hohen Scangeschwindigkeiten kommt die Grundströmung nahezu vollständig zum Erliegen und die Randströmung hat einen genügend großen Impuls senkrecht zur Werkstückoberfläche, um sich nahezu vollständig abzulösen. Hier ist in der Simulation ein zu hoher Schmelzeanteil zu beobachten, der im Werkstück verbleibt. Nahezu die Hälfte des aufgeschmolzenen Werkstoffs wird nicht entfernt sondern erstarrt im Abtragsgrund. Der Grund hierfür wurde bereits weiter oben kurz erläutert.

5. Zusammenfassung

In dem vorliegenden Beitrag konnten die Vorgänge beim Übergang zwischen Laserstrahlschweißen und Abtragsschneiden auf Basis von Experimenten und Simulationen geklärt werden. Ursächlich für diesen Übergang war der zunehmende Impuls einer Randströmung von der Werkstückoberfläche weg bei steigender Scangeschwindigkeit und damit abnehmender Neigung der Abtragsfront, was durch die Simulationen belegt wurde. Die Simulationen zeigten deutlich die unterschiedlichen Strömungen sowie deren Änderung bei Variation der Prozessparameter, allerdings wird der Schmelzeaustrieb noch unterschätzt. An den im Beitrag genannten, zugrundeliegenden Defiziten wird derzeit gearbeitet.

Literaturverzeichnis

- [1] Voller, V.R., Cross, M., Markatos, N.C., 1987. Enthalpy Method for Convection/Diffusion Phase Change. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 24 (1), 271-284.
- [2] Schoonderbeek, A., 2005. Laser Drilling of Metals with a XeCl Excimer Laser, Phd-Thesis University of Twente.
- [3] Otto, A.; Koch, H.; Gomez Vazquez, R., 2012. Multiphysical Simulation of Laser Material Processing, Physics Procedia, Vol. 39, 843-852.
- [4] Otto, A.; Koch, H.; Gómez Vázquez, R.; Lin, Z.; Hainsey, B., 2014. Multiphysical Simulation of ns-Laser Ablation of Multi-material LED-structures, Physics Procedia, Vol. 56, 1315-1324.