



Verborgenes sichtbar machen - Hochgeschwindigkeits-Röntgendiagnostik bei der Lasermaterialbearbeitung am deutschen Elektronensynchrotron

Im Herbst 2020 wurde Stuttgarter und Aachener Wissenschaftlern vom Institut für Strahlwerkzeuge (IFSW) und vom Lehrstuhl für Lasertechnik (LLT) eine Woche Versuchszeit am deutschen Elektronensynchrotron (DESY) in Hamburg zur Verfügung gestellt. Ob Schweißen, Schneiden oder selektives Laserstrahlschmelzen, der monochrome Röntgenstrahl sorgte für spektakuläre Einblicke in die verschiedenen Lasermaterialbearbeitungsprozesse.

Die Röntgenanlage am IFSW [1] liefert seit mehr als 10 Jahren zuverlässig Bilder aus dem Inneren von Lasermaterialbearbeitungsprozessen und hat dadurch zu einer Vielzahl von Erkenntnissen über das Kapillarverhalten [2] oder die Porenbildung [3] beim Laserstrahlschweißen und über die Absorption beim Laserstrahlschneiden [4] geführt. Die große Divergenz und das breite elektromagnetische Spektrum der Röntgenquelle am IFSW ermöglichen zwar kurze Belichtungszeiten und damit die Analyse hochdynamischer Vorgänge, beeinträchtigen aber die örtliche Auflösung der Aufnahmen. Der Ringbeschleuniger des DESY erzeugt monochrome Röntgenstrahlung mit geringer Divergenz, was eine hohe optische Auflösung bei der Röntgendiagnostik ermöglicht. Für die Versuche am DESY wurde die Anlagen- und Versuchstechnik am LLT in Aachen im Rahmen des Sonderforschungsbereiches SFB1120 in Kooperation mit dem IFSW und mit der Unterstützung von Dr. Felix Beckmann vom DESY entwickelt und aufgebaut. Als Strahlquelle wurde ein TruDisk5000 Laser von TRUMPF verwendet. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 1 skizziert. Der Röntgenstrahl

(grün) aus dem Elektronenbeschleuniger mit einem mittleren Strahldurchmesser von ca. 3 mm durchdringt die Probe (grau) während der Schweißung und wird je nach Materialeigenschaften unterschiedlich absorbiert. Die Röntgenphotonen werden auf dem Szintillator (hellblau) in sichtbares Licht umgewandelt. Dieses wird von einer High-speed (HS) Kamera (dunkelblau) aufgenommen.

Durchdringt der monochrome kohärente Röntgenstrahl einen Werkstoff mit lokal unterschiedlichen Brechungsindizes, kann dies zu einem Phasenkontrast und Interferenzeffekten auf dem Szintillator führen. Hierdurch ist nicht nur der Unterschied zwischen dem gasförmigen und dem festen Werkstoff anhand des Dichteunterschiedes sichtbar, sondern sogar der Übergang zwischen flüssigem und festem Werkstoff. Dieser Effekt zeigt sich vor allem bei Schweißprozessen. In Abbildung 2 kann sowohl beim Wärmeleitungsschweißen (Abbildung 2a) als auch beim Tiefschweißen (Abbildung 2b) die Schmelzbadgeometrie anhand einer dunklen Linie mit reduziertem Grauwert identifiziert werden. In

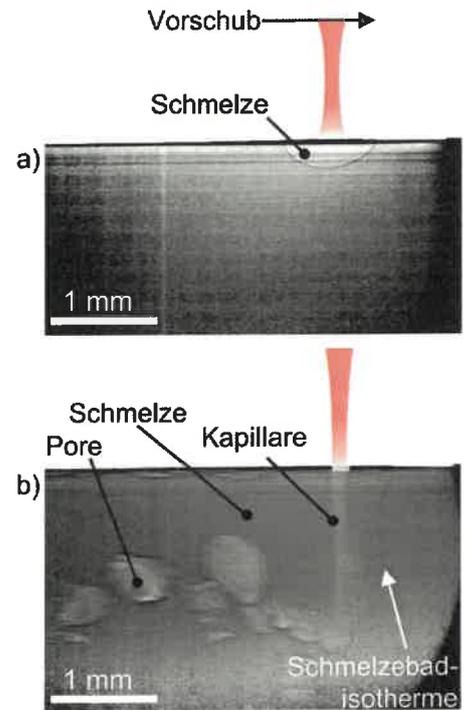


Abbildung 2: Wärmeleitungsschweißen (a) und Tiefschweißen (b) von Al99.5

beiden Abbildungen bewegt sich der Laserstrahl relativ zur Probe von links nach rechts mit einer Geschwindigkeit von 100 mm/s. Die Laserleistung betrug 1 kW fokussiert auf einen Durchmesser von 100 µm. In Abbildung 2a ist die Fokusslage 5 mm oberhalb der Probenoberfläche und in Abbildung 2b auf der Probenoberfläche.

Beim Wärmeleitungsschweißen lässt sich wie erwartet ein stabiler Prozess erkennen, bei dem sich die Schmelzbadisotherme allein durch Wärmeleitung halbkugelförmig ausbreitet. Der dargestellte Tiefschweißprozess in Abbildung 2b ist durch eine stark ausgeprägte Bildung von Poren gekennzeichnet. Die Poren und die Dampfkapillare sind durch die helleren Bereiche zu erkennen.

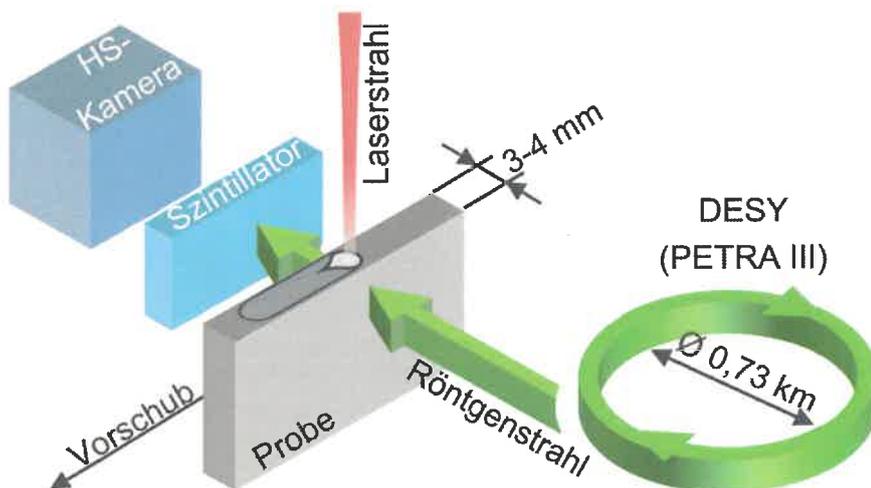


Abbildung 1: Versuchsaufbau am DESY

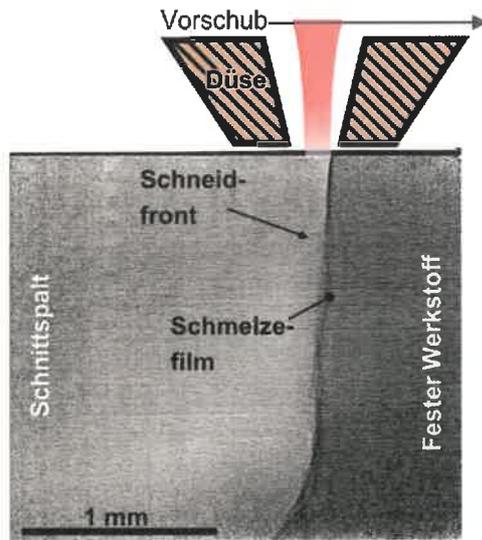


Abbildung 3: Laserstrahlschneiden von 2 mm dickem AlMg3 Blech

Beim Laserstrahlschneiden kann aus solchen Videos die lokale Dicke des auszutreibenden Schmelzefilmes an der Schneidfront ermittelt werden. Abbildung 3 zeigt die Aufnahme eines Schneidprozesses von 2 mm dickem Aluminiumblech bei einer Laserleistung von 1 kW und 2,5 m/min Vorschubgeschwindigkeit. Zur Fokussierung des Laserstrahls und Erzeugung des Gasstromes wurde der Schneidkopf Pro-Cutter Zoom2.0ET von PRECITEC eingesetzt.

Die Schneidfrontgeometrie hebt sich im Einzelbild deutlich hervor. Es zeigt sich, dass bei instabilen Schnitten der Schnittfrontwinkel im unteren Blechbereich deutlich flacher wird (vgl. Ergebnisse in [4]). Dies hat eine lokale Erhöhung der absorbierten Intensität zur Folge, sodass mehr Material aufgeschmolzen wird. Da dieses erhöhte Schmelzevolumen nicht optimal ausgetrieben wird, kommt es zu einer sichtbaren Vergrößerung der Schmelzefilmstärke.

Bei dem generativen Verfahren des selektiven Laserstrahlschmelzens im Pulverbett kommt es nur zu einer minimalen Verdrängung von Schmelze durch Verdampfung und nicht zur Bildung von Dampfkapillaren mit Aspektverhältnissen > 1 . Grund hierfür sind die hohen Vorschübe und die kleinen Strahldurchmesser. Die hohe örtliche Auflösung bei der Röntgendiagnostik mit Synchrotronstrahlung ermöglicht selbst diese winzigen Strukturen sichtbar zu machen. Zur experimentellen Simulation der Pulver-

bettbedingungen wurde auf den additiv vorgefertigten Grundkörper aus AlSi10Mg eine 50 μm dicke Pulverschicht vor Ort aufgetragen und die Probe unterhalb der Optik mit feststehendem Laserstrahl bewegt. Entsprechend der Referenzparameter aus der additiven Fertigung wurde der Prozess bei einer Streckenenergie von 500 J/m untersucht. Hierfür wurde ein Vorschub von 1,5 m/s und eine Laserleistung von 750 W gewählt. Der Fokussdurchmesser des Laserstrahls betrug auf der Probenoberfläche 100 μm . Abbildung 4 zeigt ein Einzelbild aus der Videosequenz des gesamten Prozesses.

Der höhere Grauwert in der Umgebung der Laserstrahl-Werkstück-Wechselwirkungszone zeigt, dass im betreffenden Bereich Werkstoff verdrängt wird, was ein eindeutiges Indiz für Verdampfungsvorgänge ist. Diese Zone reduzierter Dichte zeigt eine ähnliche Geometrie wie die keilförmigen Kapillaren beim Hochgeschwindigkeitsschweißen von Aluminiumlegierungen, die in [2] beschrieben werden. Das Auftreten von Verdampfung und die damit verbundenen Energieeinkopplungsmechanismen sind somit auch beim selektiven Laserstrahlschmelzen eine signifikante Einflussgröße. Das erklärt, warum die Messung von Einkoppelgraden beim selektiven Laserstrahlschmelzen in [5] mit den Einkoppelgraden beim Hochgeschwindigkeitsschweißen in [2] vergleichbar sind.

Die hohe Brillanz des Röntgenstrahls am DESY und die hervorragende Kooperation der beiden Forschungseinrichtungen LLT und IFSW führten zu

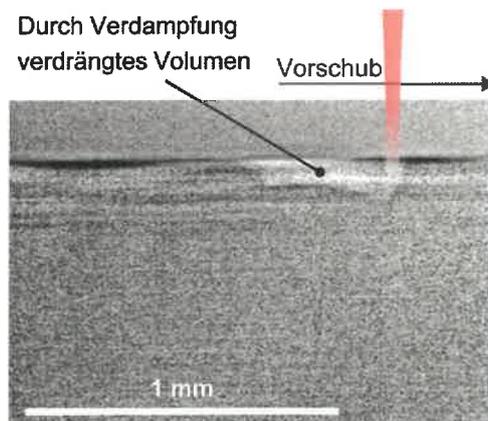


Abbildung 4: Selektives Laserstrahlschmelzen von AlSi10Mg

einzigartigen Bildern aus dem Innersten von Lasermaterialbearbeitungsprozessen. Aufbauend auf dieser erfolgreichen Zusammenarbeit und den neuen Erkenntnissen sind bereits neue Versuchskampagnen für 2021 geplant, in welchen durch weitere Optimierungsmaßnahmen der Diagnosetechnik noch dynamischere Prozessphänomene festgehalten werden sollen.

LITERATURVERZEICHNIS:

- [1] Boley M, Fetzer F, Weber R, Graf T. High-speed x-ray imaging system for the investigation of laser welding processes. Journal of Laser Applications 2019 31(4): 42004.
- [2] Fetzer F, Hagenlocher C, Weber R, Graf T. Geometry and stability of the capillary during deep-penetration laser welding of AlMgSi at high feed rates. Optics & Laser Technology 2020 133: 106562.
- [3] Fetzer F, Sommer M, Weber R, Werbepals J-P, Graf T. Reduction of pores by means of laser beam oscillation during remote welding of AlMgSi. Optics and Lasers in Engineering 2018 108: 68–77.
- [4] Lind J, Fetzer F, Hagenlocher C, Blazquez-Sanchez D, Weber R, Graf T. Transition from Stable Laser Fusion Cutting Conditions to Incomplete Cutting Analysed with High-speed X-ray Imaging. Journal of Manufacturing Processes 2020 60: 470–80.
- [5] Leis A, Weber R, Graf T. Influence of the process parameters on the absorptance during Laser-Based Powder Bed Fusion of AlSi10Mg. Procedia CIRP 2020 94: 173–6.

AUTOREN:

Christian Hagenlocher (IFSW)
Jannik Lind (IFSW)
Artur Leis (IFSW)
Eveline Reinheimer (IFSW)
Jonas Wagner (IFSW)
Rudolf Weber (IFSW)
Marc Hummel (LLT)

KONTAKT:

Dr.-Ing. Christian Hagenlocher
Institut für Strahlwerkzeuge (IFSW)
Pfaffenwaldring 43, 70569 Stuttgart
Tel.: +49 (0)711 685 66855
christian.hagenlocher@ifsw.uni-stuttgart.de
www.ifsw.uni-stuttgart.de

Priv.-Doz. Dr. phil. nat. Rudolf Weber
Institut für Strahlwerkzeuge (IFSW)
Pfaffenwaldring 43, 70569 Stuttgart
Tel.: +49 (0)711 685 66844
rudolf.weber@ifsw.uni-stuttgart.de
www.ifsw.uni-stuttgart.de