

## Teilprojekt A01

### Titel

Steuerung von Geometrie und Metallurgie beim Laserstrahl-Mikroschweißen durch Beeinflussung der Schmelzbaddynamik über örtlich und zeitlich angepassten Energieeintrag

### Projektleitung/-bearbeitung

Projektleitung: Dr.-Ing. Gillner, Arnold

Projektbearbeitung: Hummel, Marc; Küpper, Moritz

Lehrstuhl für Lasertechnik (LLT), RWTH Aachen University

### Aufgabenstellung

Ziel in Phase 2 des Teilprojektes ist die Beeinflussung der in Phase 1 ermittelten präzisionsbestimmenden Faktoren beim Laserstrahl-Mikroschweißen. Dadurch wird angestrebt, eine Erhöhung der Schweißnahtpräzision bzgl. geometrischer Eigenschaften (Einschweißstiefenkonstanz  $\leq 1\%$ , Schweißstiefenkontrolle  $\leq 5\ \mu\text{m}$ ) und funktionale Qualität (Rauheit  $R_z \leq 10\ \mu\text{m}$ , Porosität  $\leq 5\%$ ) zu erreichen.

Der Hauptschwerpunkt der ersten Phase im SFB 1120 lag auf der Untersuchung von Ursache-Wirkungs-Zusammenhängen und der detaillierten Untersuchung des Einkoppelgrades beim Laserstrahl-Schweißprozess.

Im weiteren Verlauf des Projektes werden diese bereits entwickelten Analysemethoden genutzt, um die entsprechenden Dynamiken der Dampfkapillare, der Schmelze und der Erstarrung zu visualisieren. Hauptaugenmerk liegt dabei auf der Untersuchung zum Einfluss der Bearbeitungswellenlänge auf den Schweißprozess.

### Vorgehensweise

Für die Weitergehenden Untersuchungen der Laserstrahlprozesse am Deutschen-Elektronen Synchrotron in Hamburg wurde in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT, dem IFSW der Universität Stuttgart, dem LPT

der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg und der TU Ilmenau ein Gruppenantrag gestellt. Dieser wurde im Dezember 2021 positiv bewertet. Dem SFB stehen nun in den Jahren 2022 und 2023 insgesamt 20 Tage Messzeit á 3 Schichten am DESY zur Verfügung, um die entwickelten Kompensationsmethoden detailliert zu untersuchen und die Diagnosemethode weiterzuentwickeln. Für diese zukünftige Versuchsreihe wurde der im Jahr 2020 erstellte mobile Versuchsaufbau für das Laserstrahlschneiden erweitert, um weitere Prozesse innerhalb des SFB1120 zu untersuchen.

Inhaltlich wurde im Teilprojekt A01 im Jahr 2021 die Möglichkeit untersucht, durch die Kombination von örtlicher und zeitlicher Leistungsmodulation die Nahtgeometrie beim Laserstrahl-Mikroschweißen gezielt zu verändern. Dafür werden zwei Modulationsstrategien entwickelt, die zwei unterschiedliche Nahtgeometrien erzeugen. Mit der V-Strategie, soll die größte Einschweißtiefe in der Mitte der Schweißnaht mit steilen Flanken zum Nahrand erreicht werden. Bei der W-Strategie ist das Ziel an den Rändern der Schweißnaht eine größere Einschweißtiefe zu erreichen als in der Mitte der Schweißnaht. Zusätzlich wurde untersucht, welchen Einfluss die Laserstrahl-Wellenlänge (515 nm und 1070 nm) auf die Nahtgeometrie und die Energieeinkopplung bei Anwendung von örtlicher und zeitlicher Leistungsmodulation hat.

Für die Auswertung der Synchrotronstrahlversuche aus dem Jahr 2020 und die kommenden Versuchsreihen im Jahr 2022 und 2023 wurde des Weiteren daran gearbeitet, die gewonnenen Bilddaten der Phasenkontrast-Aufnahmen automatisiert auszuwerten. Dazu wurde ein Tool entwickelt, welches das Postprocessing der Bilder sowie das anschließende Segmentieren der Einzelbilder vornimmt. Ziel ist hierbei die Extraktion relevanter geometrischer Größen der Dampfkapillare und die dynamische Veränderung dieser innerhalb einer Schweißung.

Der mittels Zweistrahl-optik kombinierte Laserstrahlschweiß / -polierprozess wurde zeitlich getrennt sowie simultan untersucht und mittels Hochgeschwindigkeitsvideographie beobachtet.

## Ergebnisse

Die Untersuchungen zeigen, dass beide Modulationsstrategien mit beiden Wellenlängen in der Lage sind die Nahtgeometrie erfolgreich zu verändern. Dabei zeigen sich wesentliche Unterschiede zwischen den beiden verwendeten Wellenlängen. Bei 515 nm wird in allen Versuchen ein mittlerer Einkoppelgrad von  $\bar{\eta} \approx 60\%$  erreicht. Mit 1070 nm hingegen wird bei der konventionellen Schweißnaht ohne zeitliche Leistungsmodulation ein mittlerer Einkoppelgrad von  $\bar{\eta} \approx 70\%$  erreicht, während bei beiden Modulationsstrategien der mittlere Einkoppelgrad auf  $\bar{\eta} \approx 45\%$  abfällt. Als Ursache wird dabei das unterschiedliche Absorptionsverhalten identifiziert. Da der Absorptionsgrad von Kupfer bei 515 nm größer ist als bei 1070 nm, ist eine geringere Anzahl an Reflexionen in der Dampfkapillare notwendig, um eine hohe Energieeinbringung mit 515 nm zu erreichen. Dadurch wird mit 515 nm auch bei einer großen Dynamik der Dampfkapillare ein gleichbleibender Einkoppelgrad beobachtet. Bei 1070 nm hingegen ist eine größere Anzahl an Reflexionen in der Dampfkapillare notwendig, um eine hohe Energieeinbringung zu erreichen. Dafür ist eine Dampfkapillare mit hohem Aspektverhältnis notwendig, was durch die hohe Dynamik bei der kombinierten Modulation nicht gegeben ist, da sich die Tiefe der Dampfkapillare fortlaufend stark ändert. Daher wird bei beiden Modulationsstrategien mit 1070 nm eine Verringerung des Einkoppelgrads gegenüber einer konventionellen Schweißnaht beobachtet. Ebenfalls wird beobachtet, dass der Metaldampf, der während des Schweißprozesses entsteht, sich durch zusätzliche Rayleigh-Streuung negativ auf den Prozess auswirkt. Dabei ist der Prozess mit 515 nm aufgrund der Wellenlänge stärker betroffen als der Prozess mit 1070 nm.

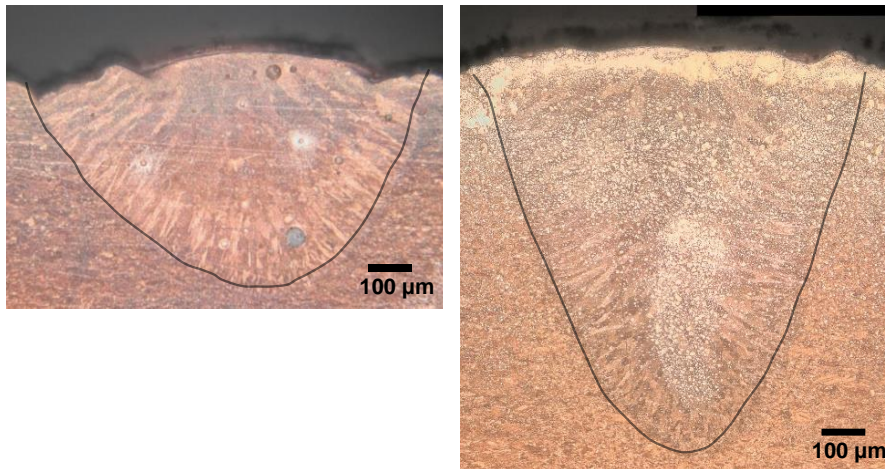


Bild 1: Vergleich zweier Schweißnahtquerschliffe mit örtlicher Leistungsmodulation bei identischen Laserparametern. Links: 515 nm Wellenlänge; Rechts: 1070 nm Wellenlänge

Weiterhin stellt sich die Berücksichtigung der Streckenenergie nicht als ausreichend heraus, da für eine punktgenaue Kontrolle des Prozesses weitere Effekte berücksichtigt werden müssen. Dies zeigt sich daran, dass bei gleicher Streckenenergie keine gleiche Einschweißtiefe erreicht wird. Dabei werden die lokale Energie, die zum Aufschmelzen vom Material benötigt wird und die Formänderung der Dampfkapillare durch die lokale Bahngeschwindigkeit als weitere relevante Effekte identifiziert. Wenn der lokale Energiebedarf zum Aufschmelzen des Materials steigt, steht der Dampfkapillare weniger Energie zur Verfügung, wodurch sich die Dampfkapillare kleiner wird und damit die Absorption sinkt. Durch die Hochgeschwindigkeitsvideographie wird deutlich, dass auch durch eine Änderung der Vorschubgeschwindigkeit die Form der Dampfkapillare verändert wird, was sich wiederum auf die Absorption auswirkt.

Das entwickelte Tool für die automat segmentiert die Dampfkapillaren in Form einer Binärmaske und exportiert die gewonnen geometrischen Größen wie Kapillartiefe, -länge und Winkel, damit die Daten anschließend für die weitere Auswertung genutzt werden können.

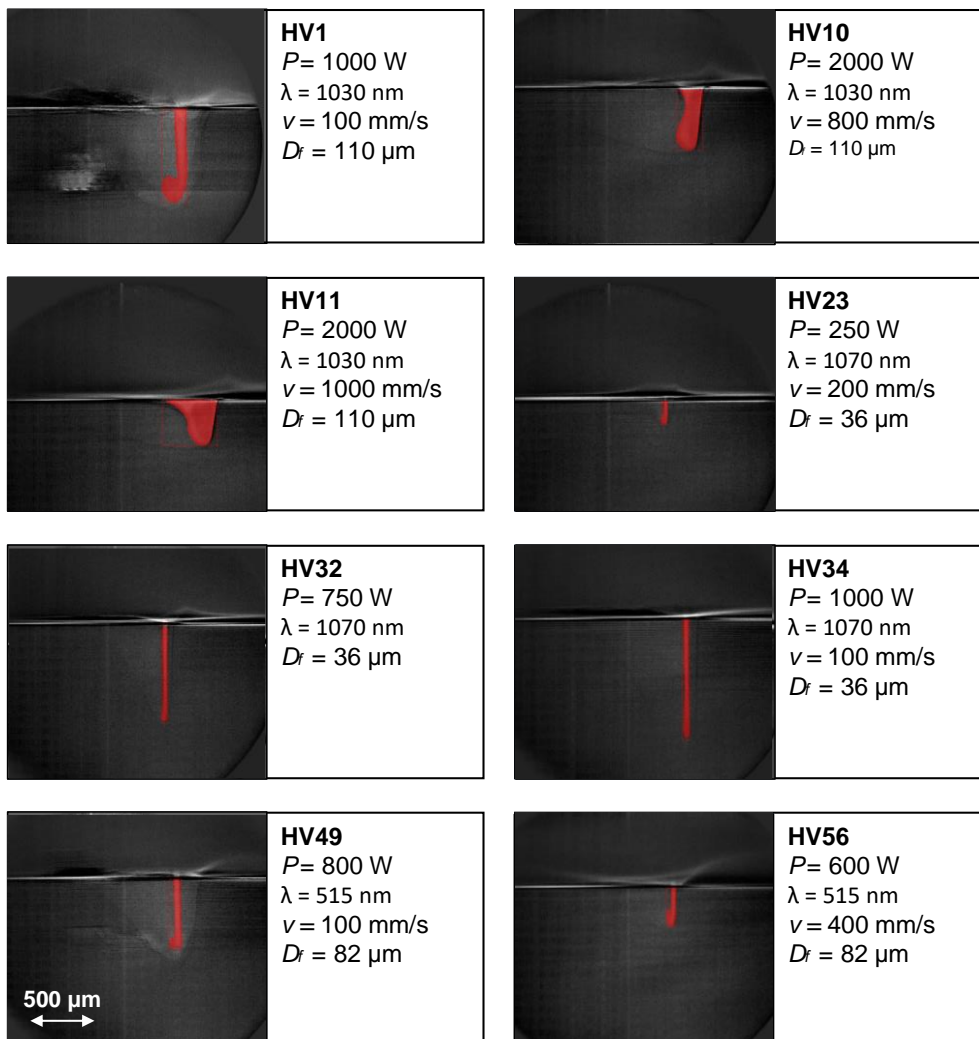


Bild 2: Automatisch segmentierte Dampfkapillargeometrien aus unterschiedlichen Parametersätzen der Synchrotron-Aufnahmen

Durch die Anwendung des Modells zur Erstellung der Binärmasken und der anschließenden Analyse der Binärmasken mit dem entwickelten Geometrie Analyse Modul ist die Untersuchung aller Bilder eines Prozesses in sehr kurzen Zeiträumen möglich. Mit dem trainierten Modell lassen sich nun große Datenmengen automatisch auswerten. Ein robustes Modell, dass auf alle untersuchten Prozessergebnisse anwendbar ist bedarf jedoch einer weiteren Optimierung der im Datensatz vorhandenen Erscheinungsformen der Dampfkapillare.

Die Zweistrahloptik ermöglicht einen für den Laserpolierprozess besser geeigneten Laserstrahldurchmesser zu verwenden als in früheren Versuchen. Während die Schweißbahn mit einem ca. 50 μm großen infraroten Laserspot erzeugt wird, wird ein 400 μm großer blauer Laserspot für das simultan nachfolgende Polieren verwendet. Dieser erzeugt ein ungestörtes Schmelzbad größer als die Schweißbahnbreite und poliert somit in einer Überfahrt.



Im Ergebnis lassen sich, je nach Material und Schweißparameter, deutliche Glättungen um einen Faktor 3 bis 6 erzielen. Die besten erzielten Schweißnaht-Rauheiten sind  $R_a = 1 \mu\text{m}$ , wie in Bild 3 auf Cu-ETP und CuSn6 dargestellt. Dabei glättet der simultane Prozess etwas besser als der zeitlich separate mit identischen Parametern.

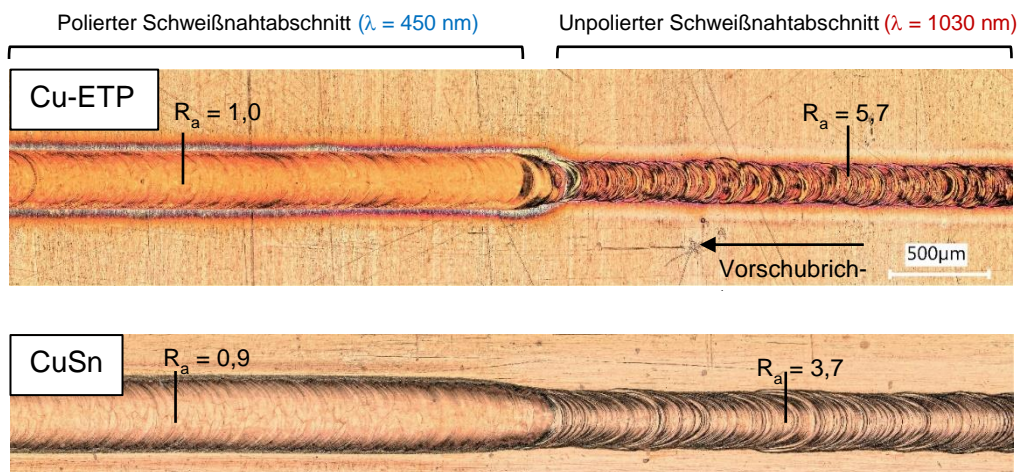


Bild 3: Mikroskopaufnahme einer simultan mittels Zweistrahl-optik laserpolierten Schweißnaht (links) und des Ausgangszustandes (rechts) auf Cu-ETP (oben) und CuSn6 (unten)

Der örtliche Abstand der beiden Laserspots wurde variiert. Jedoch zeigt sich kein signifikanter Einfluss auf das Polierergebnis, solange sich die Schmelzbäder nicht berühren und verschmelzen. In Hochgeschwindigkeitsvideographienaufnahmen zeigt sich der Kombiprozess wie in Bild 4 dargestellt.

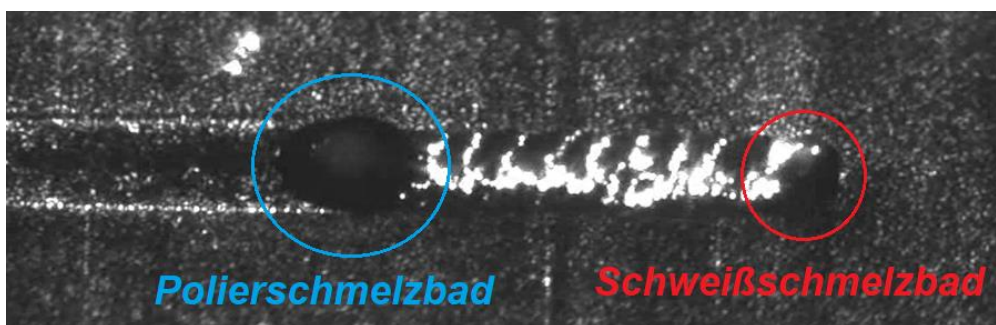


Bild 4: Hochgeschwindigkeitsvideostandbild des simultanen Kombiprozesses. Im Abstand von 1 mm auf das Schweißschmelzbad folgt das größere Polierschmelzbad. Dieses ist ungestörter und erstarrt somit deutlich glatter.

Insgesamt konnte der kombinierte simultane Laserstrahlschweiß und Laserstrahlpolierprozess erfolgreich demonstriert werden.

## Zusammenfassung und Ausblick

Die bisher entwickelten Methoden sowie die präzise Analyse des Laserstrahlschweiß- und polierprozesses werden zukünftig dafür verwendet, um Kompensationsmethoden abzuleiten und diese auf finale Schweißnähte in industrie- und anwendungsnahen Bauteilen einzusetzen. Dabei wird auch weiterhin die Diagnostik am DESY als zentrales Tool verwendet, um die Kompensation im Prozess zu visualisieren und weiterentwickeln zu können.

## Veröffentlichungen

HUMMEL, M., A. HÄUSLER, A. GILLNER. High-Precisions Adjustment of Welding Depth during Laser micro welding of Copper Using Superpositioned Spatial and Temporal Power Modulation, *Journal of Manufacturing and Materials Processing* 5 (2021), 127, DOI: <https://doi.org/10.3390/jmmp5040127>

Häusler, A. Increased precision in laser beam microwelding using an adapted energy management; Dissertation, RWTH Aachen University, 2021, ISBN: 978-3-86359-933-1, DOI: <https://doi.org/10.18154/RWTH-2021-01569>

Wagner, J.; Hagenlocher, C.; Hummel, M.; Olowinsky, A.; Weber, R.; Graf, T. Synchrotron X-ray Analysis of the Influence of the Magnesium Content on the Absorptance during Full-Penetration Laser Welding of Aluminum. *Metals* 2021, 11, 797, DOI: [10.3390/met11050797](https://doi.org/10.3390/met11050797).

Hummel, M.; Schöler, C.; Gillner, A. Metallographic Comparison for Laser Welding of Cu-ETP and CuSn6 with Laser Beam Sources of 515 nm and 1030 nm Wavelength. In *Enhanced material, parts optimization and process intensification: Proceedings of the first International Joint Conference on Enhanced Material and Part Optimization and Process Intensification, Emporia 2020, May 19-20, 2020, Aachen, Germany*; Reisgen, U., Drummer, D., Marschall, H., Eds.; Springer: Cham, 2021; pp 14–28, ISBN 978-3-030-70331-8, DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-70332-5\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-030-70332-5_2).

Hummel, M.; Kulkens, M.; Schöler, C.; Schulz, W.; Gillner, A. In situ X-ray tomography investigations on laser welding of copper with 515 and 1030 nm laser beam sources. *Journal of Manufacturing Processes* 2021, 67, 170–176, DOI: [10.1016/j.jmapro.2021.04.063](https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.04.063).

Wagner, J.; Hagenlocher, C.; Hummel, M.D.; Olowinsky, A.; Weber, R.; Graf, T. High-speed synchrotron X-ray investigation of full penetration welding of aluminum sheets. In [Lasers in Manufacturing Conference 2021, LiM, 2021-06-21 - 2021-06-24, München, Germany], 2021; pp 604–608.

Reinheimer, E.; Hummel, M.D.; Olowinsky, A.; Weber, R.; Graf, T. High-speed synchrotron x-ray imaging of the formation of wedge-shaped capillaries during laser-beam welding at high feed rates. In [Lasers in Manufacturing Conference 2021, LiM, München, Germany], 2021; pp 244–250.

Küpper, M.E.; Hummel, M.D.; Pandey, R.K.; Häfner, C. Laser polishing of laser micro weld seams on Cu-ETP and CuSn6 with green laser radiation. In [Lasers in Manufacturing Conference 2021, LiM, München, Germany], 2021; pp 137–146.

Hummel, M.D.; Häusler; Hollatz; Hagenlocher, C.; Lind, J.; Halm, U.; Schöler, C.; Olowinsky, A.; Gillner. Temporally and spatially highly resolved reconstruction of vapor capillary geometry during laser beam welding using synchrotron radiation. In [Lasers in Manufacturing Conference 2021, LiM, 2021-06-21 - 2021-06-24, München, Germany], 2021; pp 979–989.