

Teilprojekt A11

Titel

Maß- und Formgenauigkeit beim generativen Laserstrahl- Auftragschweißen

Projektleitung/-bearbeitung

Poprawe, Reinhart, Prof. Dr. rer. nat., Lehrstuhl für Lasertechnik

Schleifenbaum, Johannes Henrich, Prof. Dr.-Ing. Dipl. Wirt.-Ing., Lehrstuhl für Digitale Additive Produktion

Gasser, Andrés, Dr.-Ing.

Pirch, Norbert, Dr. rer. nat.

Linnenbrink, Stefanie, Dipl.-Ing.

Aufgabenstellung

Ziel der Arbeiten in Teilprojekt A11 ist die Beherrschung des Prozesses zum generativen Laserstrahl- Auftragschweißen (LMD). Dazu werden die Einfluss-Wirkzusammenhänge zwischen Prozessstrategie und Verfahrensparametern auf die Maß- und Formgenauigkeit beim LMD erforscht.

Im experimentellen Teil werden in diesem Projektjahr die Arbeiten zum LMD auf ebenen, unterschiedlich geneigten Oberflächen weitergeführt, und Prozessdiagramme für Einzelspuren und Flächen erstellt.

Bei der Reparatur von beispielsweise dünnwandigen Bauteilen ist für die Nacharbeit ein geeigneter Überhang erforderlich. Gleichzeitig darf das Übermaß nicht zu groß sein, um den Aufwand für die Nacharbeit klein zu halten. Um die Korrelation von Überhang und Schweißstrategie zu bestimmen, werden Spuren auf Kanten laserauftragsgeschweißt, wobei beispielsweise die Position von Laserstrahlung zur Kante variiert wird.

Die Versuche werden mittels Hochgeschwindigkeitsvideographie analysiert. In der Vergangenheit konnten mit der zur Verfügung stehenden Beleuchtung Bildraten bis maximal 4 kHz realisiert werden. Um Analysen mit größeren Bildraten durchführen zu können und Reflektion auf der Schmelzbadoberfläche zu minimieren wurde die Beleuchtungstechnik angepasst.

Von modelltheoretischer Seite ist das für die Konturgenauigkeit relevante Laserauftragschweißen auf Kanten analysiert worden. Die wissenschaftliche Fragestellung dabei ist zu klären, inwieweit d.h. bis zu welchen Grenzen durch eine geeignete Strahlneigung und Abstand zur Bauteilkante Geometrien mit Überhang erzeugt werden können, oder ob durch Hinzunahme eines Dreh-Kipptisches eine geeignete Orientierung der Flächennormalen entlang der Konturfahrt realisiert werden muss.

Weitere modelltheoretische Untersuchungen betreffen ein vertieftes Prozessverständnis bzgl. der Entstehungsmechanismen von Eigenspannungen und Verzug beim LMD auf Basis dessen eine verbesserte Prozessführung bzgl.

geringerem Verzug abgeleitet werden soll. Dazu ist das Simulationstool durch ein weiteres Modul für die Strukturmechanik ergänzt worden.

Vorgehensweise

- 1) Experimentelle Untersuchungen
 - a) LMD auf geneigten Flächen

Um festzustellen welchen Einfluss der Neigungswinkel und die Prozessstrategie auf die Geometrie einer laserauftraggeschweißten Fläche hat, wurden einlagige Volumina auf unterschiedlich geneigten Probenplatten geschweißt. Der Neigungswinkel wurde von 0° bis 60° in 15° Schritten variiert. Zusätzlich wurden drei unterschiedliche Schweißstrategien eingesetzt. Bei den Strategien „Horizontal 1“ und „Horizontal 2“ werden Z- parallele Spuren mit einem Überlapp von ca. 50% der Spurbreite mäandertförmig laserauftraggeschweißt. Bei Strategie „Horizontal 1“ wird unten auf der Platte begonnen, und sukzessive von unten nach oben geschweißt (Bild 1, links), bei Strategie „Horizontal 2“ wird oben begonnen, und von Spur zu Spur in negative Z- Richtung versetzt (Bild 1, Mitte). Bei der dritten Strategie „Vertikal“ wird abwechselnd eine Spur von unten nach oben und eine Spur von oben nach unten laserauftraggeschweißt (Bild 1, rechts).

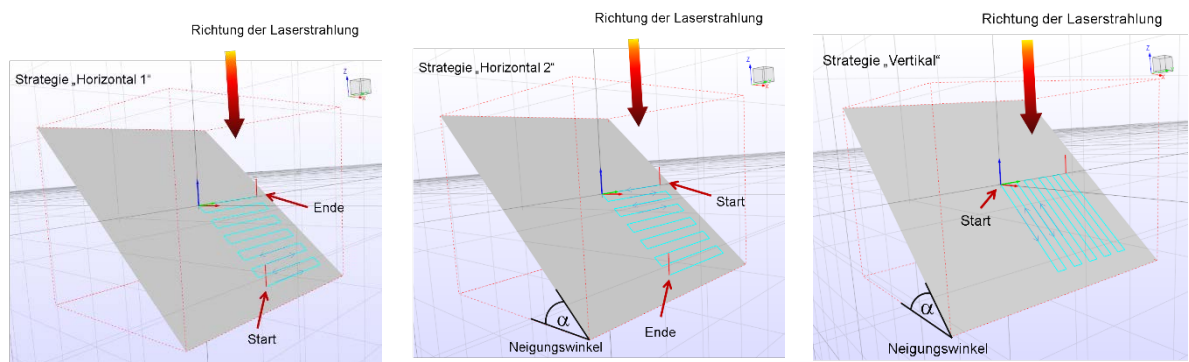


Bild 1: LMD auf geneigten Flächen, Variation der Schweißstrategie: mäandertförmig von unten nach oben (Strategie Horizontal 1, links), mäandertförmig von oben nach unten (Strategie Horizontal 2, Mitte), und alternierend eine Spur von unten nach oben und eine Spur von oben nach unten (Strategie Vertikal, rechts)

Alle laserauftraggeschweißten Lagen werden optisch gescannt, und ein Höhenprofil ermittelt (Bild 2, links). Dieses Höhenprofil wird 20 mal gleichmäßig über die gesamte Fläche verteilt senkrecht zur Haupt-Vorschubrichtung geschnitten und in einem Diagramm dokumentiert (Bild 2, rechts), sowie die Mittlere Höhe und die minimalen und maximalen Abweichungen bestimmt.

Zusätzlich wird von allen Flächen je ein Schliff senkrecht zur Haupt-Vorschubrichtung und ein Schliff parallel zur Hauptvorschubrichtung angefertigt. Alle Schliffe werden metallographisch untersucht, und in Bezug auf Lagenhöhe und Aufmischung ausgewertet.

Die Ergebnisse der Untersuchungen werden in Prozessdiagrammen dokumentiert.

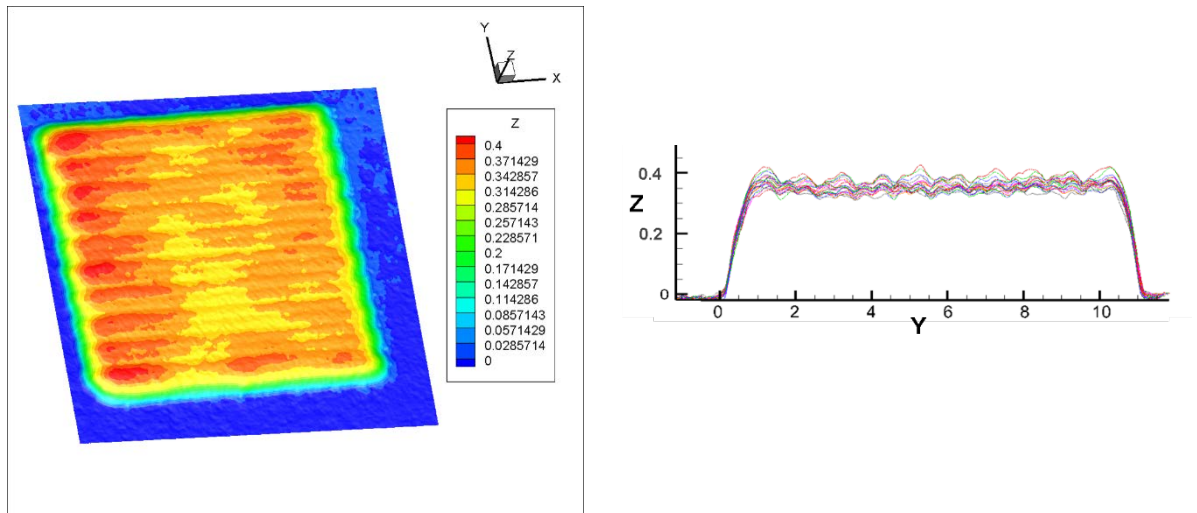


Bild 2: Analyse der Geometrie der laserauftraggeschweißten Flächen durch optisches Scannen (links) und Auswerten von 20 gleichmäßig verteilten Schnittlinien in Bezug auf die erzielte Höhe (rechts)

b) LMD auf Kanten

Um den Einfluss der Position der Laserstrahlung zur Bauteilkante auf die Spurgeometrie zu bestimmen, werden Spuren auf die Kante einer Platte laserauftraggeschweißt. Die Position der Laserstrahlung wird in 3 Stufen variiert. Zuerst wird die Laserstrahlung so justiert, dass der Abstand S von der Mitte der Laserstrahlung bis zur Kante der Platte genau gleich dem Radius R der Laserstrahlung ist (Bild 3, rechts). Für die zweite Versuchsreihe wird die Laserstrahlung um den halben Radius in Richtung Kante verschoben, so dass der Abstand S zwischen Laserstrahlmitte und Kante gleich $0,5 \times R$ ist (Bild 3, Mitte), und für die dritte Versuchsreihe wird die Laserstrahlung so positioniert, dass die Laserstrahlmitte genau auf der Kante liegt (Bild 3, links).

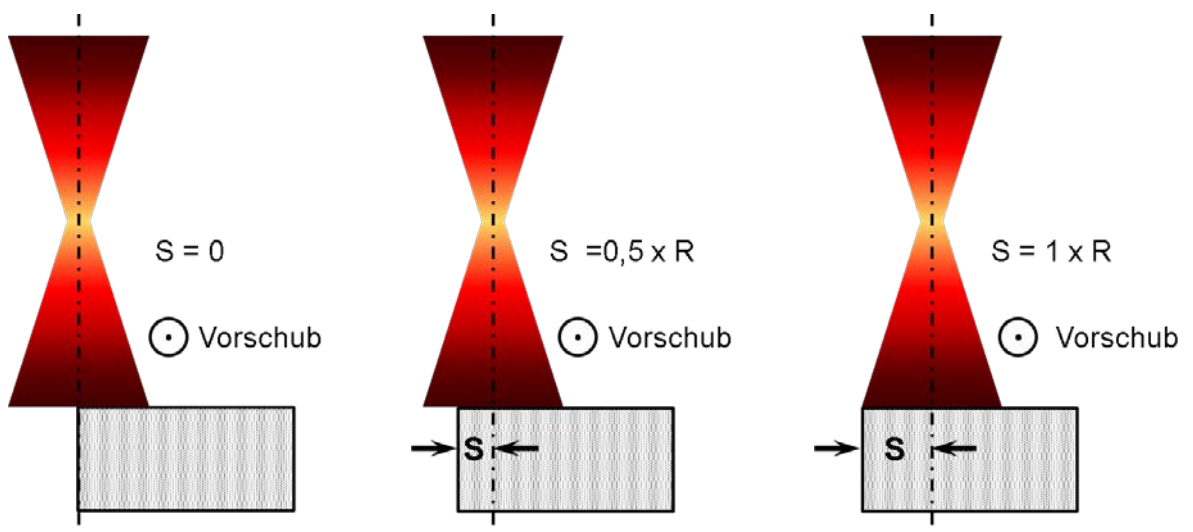


Bild 3: LMD auf Kanten, Variation der Position der Laserstrahlung zur Kante, R = Strahlradius, S = Abstand Mitte Laserstrahlung zur Kante

Alle Spuren werden optisch gescannt, und analog zur Auswertung der Flächen ein Höhenprofil erstellt. Zusätzlich wird hier ebenfalls der Überhang analysiert.

Höhe und Überhang werden über die Länge gemittelt, und die Abweichungen vom Mittelwert erfasst.

Alle Spuren werden senkrecht zur Spurlänge geschnitten und metallographisch untersucht, und in Bezug auf Spurbhöhe, Spurbbreite, Aufmischung Überhang und Pulverwirkungsgrad ausgewertet. Um den Pulverwirkungsgrad zu bestimmen, wird am Querschliff die Fläche des laserauftragsgeschweißten Bereichs bestimmt, und daraus der genutzte Pulvermassenstrom berechnet. Der Quotient aus berechnetem zu gefördertem Pulvermassenstrom ergibt dann den Pulverwirkungsgrad.

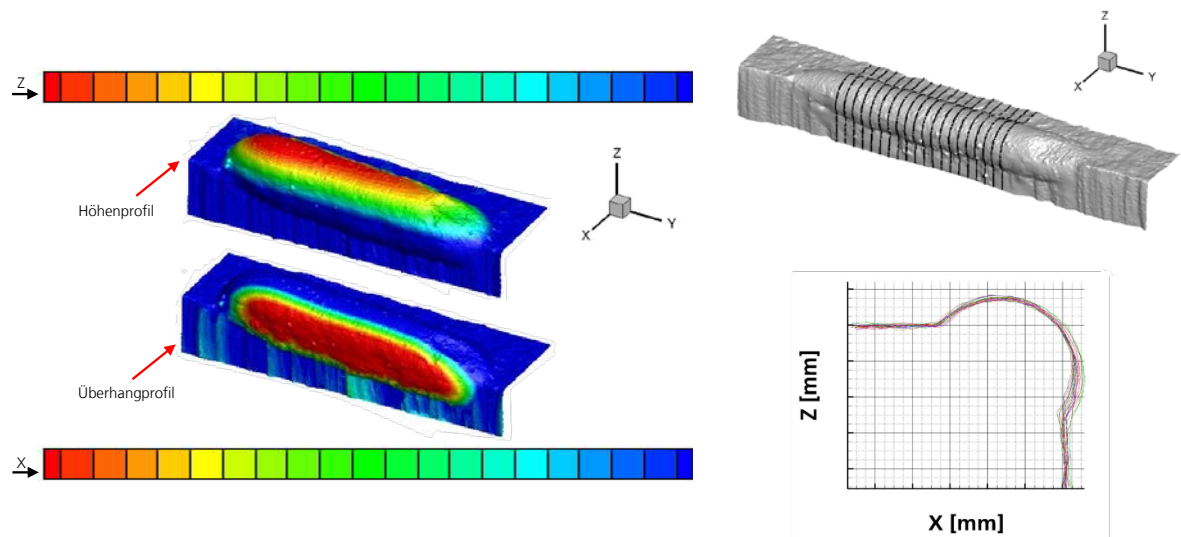


Bild 4: Analyse der Geometrie der auf Kanten laserauftragsgeschweißten Spuren durch optisches Scannen. Höhenprofil und Überhangprofil (links), der Scan wird 20 mal senkrecht zur Spurlänge geschnitten (rechts oben) und die Schnittlinien in einem Diagramm dargestellt (rechts unten)

2) Prozessdiagnostik

Die hier angewendeten Prozessparameter resultieren in Spuren, die eine Breite von ca. 1 mm, und eine Höhe von ca. 0,3 mm haben. Um bei diesem Prozess das Schmelzbad mit einer großen örtlichen Auflösung darstellen zu können wird für die Hochgeschwindigkeitsvideographie ein Makroobjektiv eingesetzt, dass technologiebedingt lichtschwach ist. Daher ist der Einsatz einer geeigneten Beleuchtungstechnik von entscheidender Bedeutung. In der Vergangenheit konnte mit einem 8 W Diodenlaser als Lichtquelle und direkter Beleuchtung bei der Hochgeschwindigkeitsvideographie eine Bildrate von 4 kHz erzielt werden. Durch die direkte Beleuchtung konnte zudem ein großer

Teil des Schmelzbads nicht beobachtet werden, weil Reflektionen das Schmelzbad überstrahlen.

Um eine größere Bildrate bei der Hochgeschwindigkeitsvideographie zu erzielen, wurde im Rahmen des SFB ein neuer Beleuchtungslaser beschafft. Dabei handelt es sich um einen gepulsten Cavilux Diodenlaser mit einer Ausgangsleistung von 500 W.

Für die Versuche wird dieser Laser durch die Hochgeschwindigkeitskamera getriggert. Um die Reflektionen auf der Schmelzbadoberfläche zu minimieren, werden Kupferspiegel mit ebenen oder unterschiedlich gekrümmten und sandgestrahlten Oberflächen eingesetzt. Das Objektiv des Beleuchtungslasers und der Kupferspiegel werden so positioniert, dass die Laserstrahlung des Beleuchtungslasers auf den Kupferspiegel fällt, und von dort in Richtung Prozessbereich umgelenkt wird (Bild 5, Beispiel Kupferspiegel mit konkaver Oberfläche). Die Position der Hochgeschwindigkeitskamera wird dabei für die Versuche auf drei Arten variiert. Bei der ersten Einstellung wird der Prozess von der Seite beobachtet, bei der zweiten Einstellung von vorne, und bei Einstellung 3 schräg von oben (Bild 5, Beispiel Kameraposition schräg von oben in einem 57° Winkel zur Horizontalen).

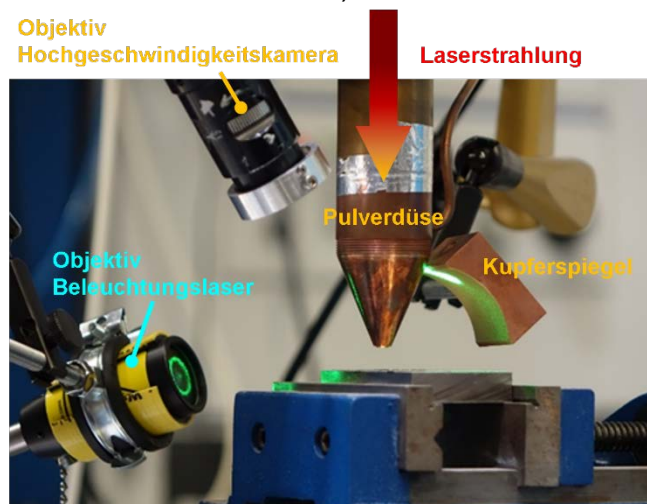


Bild 5: Versuchsaufbau Prozessdiagnostik: Vergrößerung der möglichen Bildrate und Reduktion der Reflektion durch Verbesserung der Beleuchtungstechnik. Hier ist der Blickwinkel der Hochgeschwindigkeitskamera um 57° zur Horizontalen gekippt (s. Ausrichtung Objektiv Hochgeschwindigkeitskamera).

3) Modellrechnungen

Das Simulationstool ist im vergangenen Projektzeitraum für das Randschichtschmelzen von Kanten appliziert worden. Damit sollte die Gültigkeit der im Simulationstool verwendeten Algorithmen und physikalischen Prozesse für diesen Anwendungsfall geprüft und erste Erfahrungen für das Lösen des freien Randwertproblems bei einer Kantenbearbeitung gemacht werden. Bei einem Vergleich mit experimentellen Ergebnissen bzgl. der Spurquerschnitte zeigte sich eine sehr gute Übereinstimmung. Zur Zeit laufen Arbeiten, das Simulationstool auf die Methode der Embedded Boundary

Condition umzustellen, um auch das freie Randwertproblem für parametrische Schmelzbadoberflächen lösen zu können und damit LMD bei einer Kantenbearbeitung modelltheoretisch beschreiben und voraus berechnen zu können.

Die Simulation wird mit der Finite-Elemente-Methode (FEM) auf beweglichen Netzpunkten durchgeführt, um eine konturangepasste Vernetzung zu realisieren. Für die Strukturmechanik wird zu jedem Zeitinkrement die Schmelze aus dem Modell extrahiert, sodass die Spannungen nur in der festen Phase berechnet werden. Der Löser für die Strukturmechanik ist massiv parallelisiert und zeichnet sich bei großen Gleichungssystemen durch einen geringen Speicherbedarf und eine hohe Berechnungsgeschwindigkeit aus. Erste modelltheoretische Untersuchungen bzgl. der Entstehungsmechanismen von Eigenspannungen und Verzug sind für eine bzw. zwei Lagen mit jeweils 3 überlappenden bidirektionalen Spuren durchgeführt worden (Bild 6). Ziel war es, den Einfluss der Lagendicke auf die Eigenspannungen zu untersuchen. Dabei wurde bei den zwei Lagebeschichtungen die Lagendicke zu 50% der einlagigen Beschichtung gewählt. Im Ergebnis bzgl. der verschiedenen Spannungskomponenten zeigte sich aber kein signifikanter Unterschied über das gleiche Schweißvolumen mit einer oder zwei Lagen auftraggeschweißt wurde. Die größten Spannungsspitzen zeigten sich im Übergang von der Substratoberfläche in das Schweißvolumen.

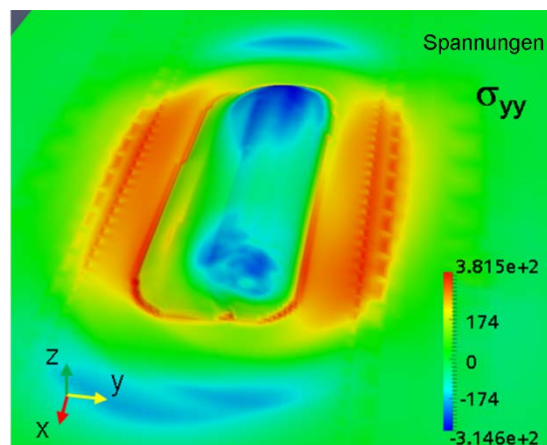


Bild 6: Simulation Spannungen

Ergebnisse

- 1) Experimentelle Untersuchungen
 - a) LMD auf geneigten Flächen

Für die laserauftraggeschweißten Lagen wurden Prozessdiagramme erstellt, die für die Bahnplanung genutzt werden sollen. Die Höhe der

laserauftraggeschweißten Lagen wird in Normalenrichtung zur Oberfläche der Probenplatte gemessen. Dabei zeigt sich, dass bei der Überlappbearbeitung die Lagenhöhe abhängig sowohl vom Neigungswinkel der Probenplatte als auch von der Schweißstrategie ist (Bild 7). Die größte Lagenhöhe wird bei einer Überlappbearbeitung auf einer ebenen Platte erzielt. Im Durchschnitt haben Flächen, die auf geneigten Platten mit Z- parallelen Spuren angeordnet von unten nach oben (Bild 1, „Horizontal 1“) laserauftraggeschweißt wurden, die größte Lagenhöhe (Bild 7). Bis zu einem Neigungswinkel von 30 ° reduziert sich die Lagenhöhe in Abhängigkeit von der Schweißstrategie um bis zu ca. 10 % von der maximalen Lagenhöhe. Für größer werdende Neigungswinkel werden die Lagenhöhen kleiner, und für einen Neigungswinkel von 60 ° und Z- parallelen Spuren, angeordnet von oben nach unten, ist die erzielte Lagenhöhe annähernd um 50 % kleiner, als die auf einer ebenen Platte erzielte Lagenhöhe.

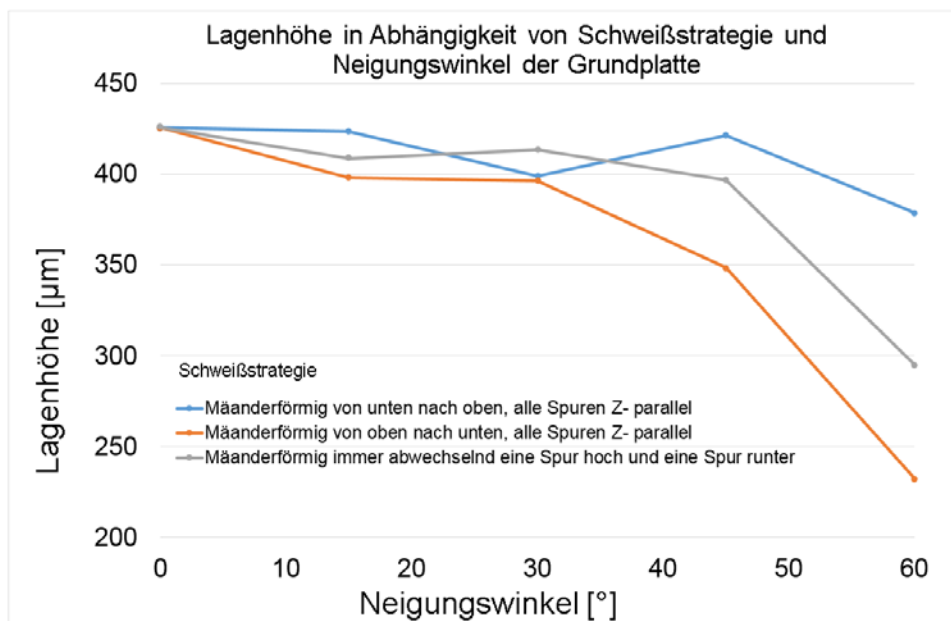


Bild 7: Prozessdiagramm: Lagenhöhe in Abhängigkeit von Schweißstrategie und Neigungswinkel der Probenplatte

b) LMD auf Kanten

Für das Laserauftragschweißen auf Kanten wurden Prozessdiagramme erstellt, in denen die Spurgeometrie in Abhängigkeit von der Position der Laserstrahlung relativ zur Kante dokumentiert wird (Bild 8).

Die Spurbreite nimmt mit zunehmendem Abstand S von Mitte der Laserstrahlung zur Kante zu. Für $S = R$ ($R =$ Radius der Laserstrahlung), ist die Spurbreite etwa gleich dem Durchmesser der Laserstrahlung, und für $S = 0$ ist die Spurbreite nur etwas größer als der Radius der Laserstrahlung.

Der Überhang nimmt mit abnehmendem Abstand S zu. Bei $S = 0$ wurde ein Überhang von ca. $40 \mu\text{m}$ erreicht, und bei einem Abstand von $S = R$ wird kein Überhang generiert.

Die Aufmischung wird ebenfalls mit abnehmendem Abstand S größer. So wird bei $S = 0$ eine Aufmischung von annähernd $200 \mu\text{m}$ erreicht, und bei $S = R$ lediglich eine Aufmischung von $70 \mu\text{m}$.

Der Pulverwirkungsgrad η nimmt zu, je weiter die Laserstrahlung über dem Werkstück liegt. So ist der Pulverwirkungsgrad bei $S = 0$ etwa 35% und bei $S = R$ etwa 78% (Bild 8, unten).

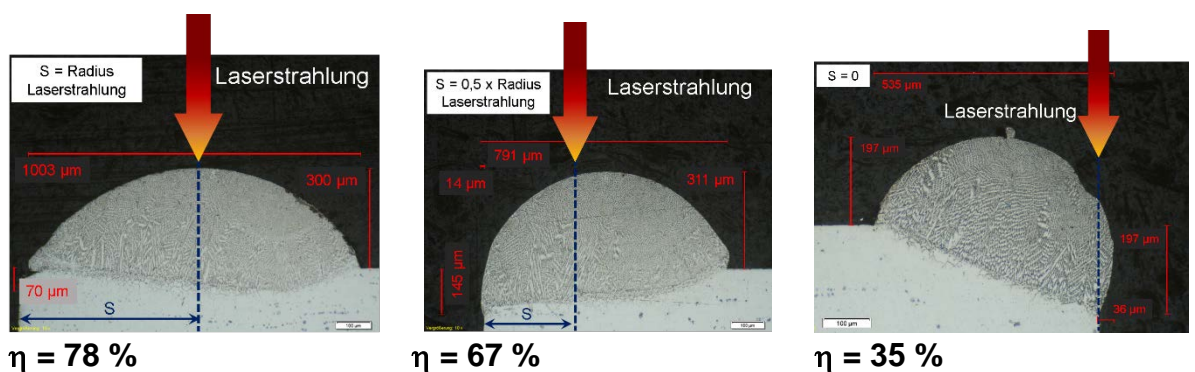
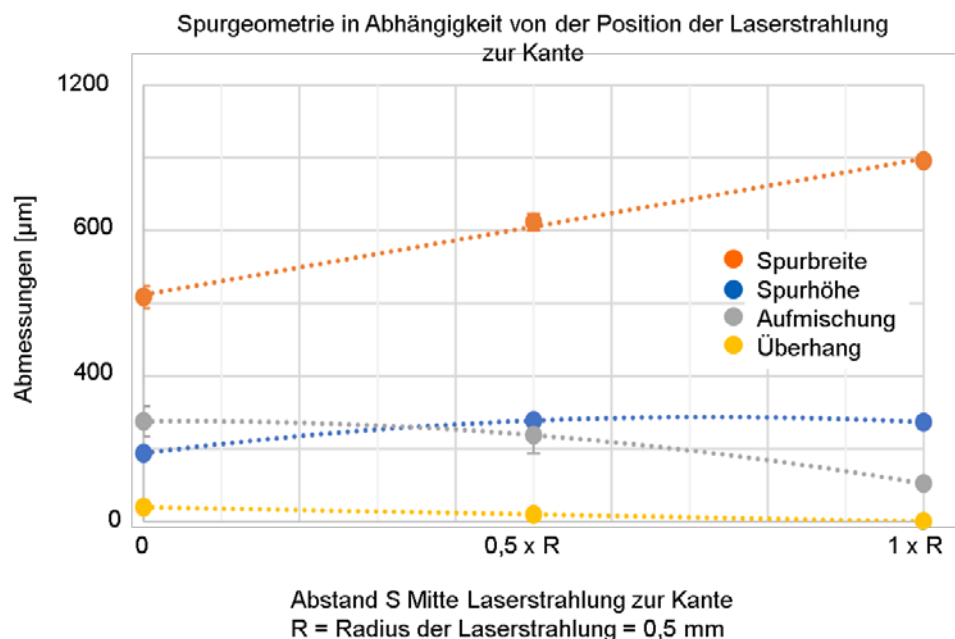


Bild 8: Spurgeometrie in Abhängigkeit von der Position der Laserstrahlung zur Kante (oben) und Querschliffe von drei laserauftragsgeschweißten Spuren, bei denen die Position der Laserstrahlung zur Kante variiert wurde (unten), mit Pulverwirkungsgrad η

2) Prozessdiagnostik

Durch die verbesserte Beleuchtungstechnik konnte die maximal mögliche Bildrate bei Hochgeschwindigkeitsaufnahmen von 4 kHz (Bild 9, links) auf 30 kHz (Bild 9, rechts) vergrößert werden. Außerdem treten jetzt nur noch

minimale Reflektionen an der Schmelzbadoberfläche auf. Jetzt kann beispielsweise eine Wellenbildung an der Schmelzbadoberfläche beim Eintauchen der Pulverpartikel in das Schmelzbad beobachtet werden, genauso wie eine Detektion von Pulvertrajektorien.

Pulverpartikel, die auf der Probenplatte liegen werden teilweise vom Schmelzbad aufgenommen, und im Bereich der Erstarrungsfront tauchen die Pulverpartikel langsamer in das Schmelzbad ein als in der Mitte des Schmelzbads.

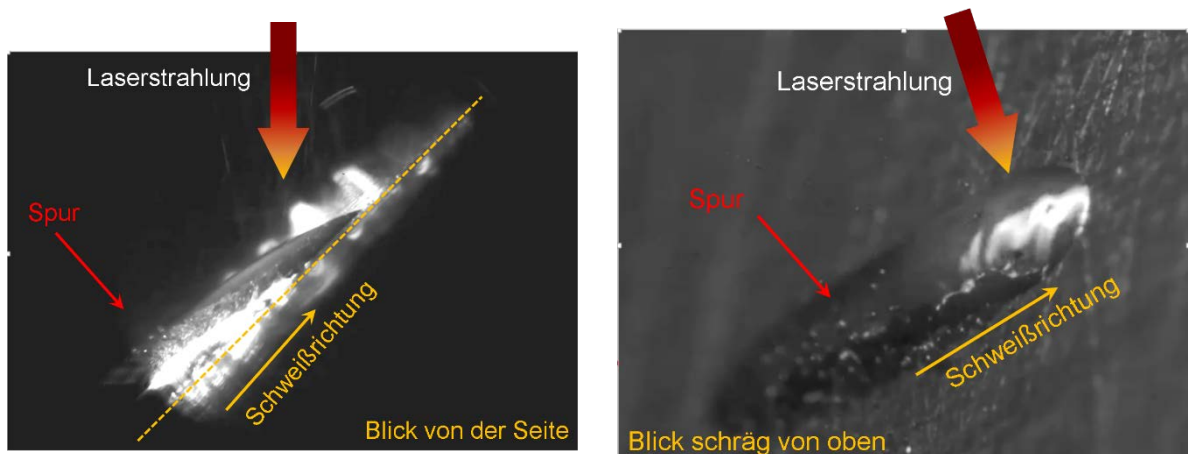


Bild 9: Prozessdiagnostik: Vergrößerung der möglichen Bildrate und Reduktion der Reflektion durch Verbesserung der Beleuchtungstechnik (2016: 4 kHz, links, 2017: 30 kHz, rechts), Beispiel LMD auf einer um 45 ° geneigten Platte

3) Modellrechnungen

Bild 10 zeigt erste Ergebnisse einer Simulation mit dem aktualisierten Simulationstool. Die Modellrechnungen werden auf einem kartesischen Gitter durchgeführt und die zeitanhängige Bauteilberandung wird über eine Grenzfläche mit beweglichen Knotenpunkten intern repräsentiert. Die Methode läuft robust und wird im nachfolgenden Projektzeitraum für einen systematischen Vergleich mit experimentellen Ergebnissen appliziert.

Bild 11 zeigt anhand von Momentaufnahmen die Entwicklung der Spannungskomponente senkrecht zur Verfahrrichtung. Bei einer Spur bilden sich unterhalb der Spur Zugspannungen und darunter Druckspannungen. Die Spur selber ist nahezu spannungsfrei. Die Ursache für die Spannungen ist die behinderte thermische Ausdehnung des erhitzten Werkstoffbereiches. Die thermischen Spannungen erreichen die Fließgrenze und initiieren ein plastisches Fließen.

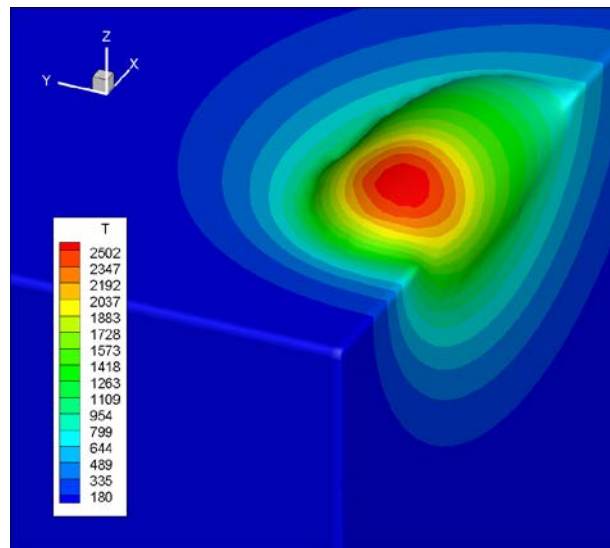


Bild 10: Simulation einer Konturfahrt entlang einer Bauteilkante

Diese plastischen Verformungen verbleiben im Werkstoff und verursachen sowohl die Eigenspannungen als auch den Verzug. Im Bereich der Spur kann sich der Werkstoff approximativ ungehindert thermisch ausdehnen und deswegen zeigt sich dort auch ein nur geringer Spannungszustand.

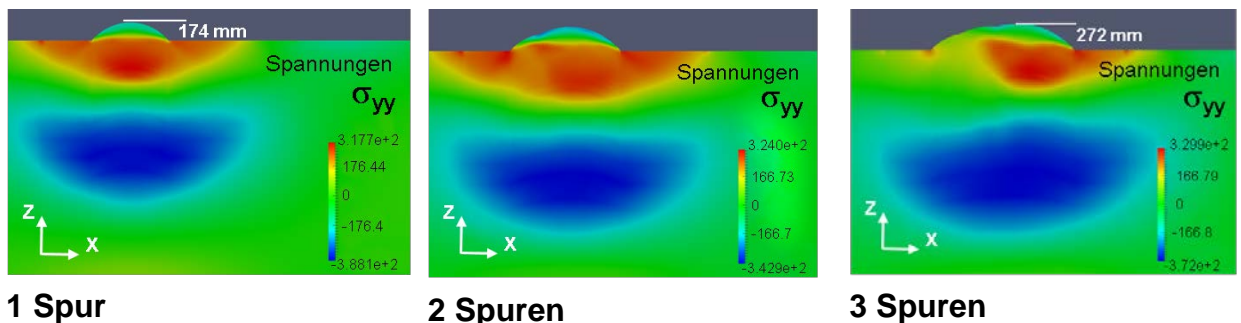


Bild 11: Berechnete Momentaufnahmen von Querschliffen mit Komponenten der Eigenspannungen für LMD von überlappenden Spuren

Bei den nachfolgenden Spuren wird im Randbereich der zuvor plastisch gestauchte Bereich plastisch gedehnt und verursacht damit eine Reduzierung der Spannungen in diesem Bereich. Im Übergang von der Substratoberfläche in das Schweißvolumen verbleibt aber eine Spannungsspitze.

Zusammenfassung und Ausblick

Flächen wurden mit unterschiedlichen Strategien auf unterschiedlich geneigte Platten laserauftragsgeschweißt, und Spuren auf Kanten. Bei allen Versuchen wurden in situ mittels Hochgeschwindigkeitsvideographie die Schmelzbäder erfasst. Die Geometrien der laserauftragsgeschweißten Flächen und Spuren wurden sowohl durch optisches Scannen als auch durch metallographische Untersuchungen analysiert, und in Prozessdiagrammen dokumentiert.

Durch eine verbesserte Beleuchtungstechnik konnten die maximal anwendbare Bildrate bei der Hochgeschwindigkeitsvideographie von 4 kHz auf 30 kHz vergrößert, und die Reflektionen an den Schmelzbadoberflächen minimiert werden.

Die Embedded Boundary Methode wurde erfolgreich in das Simulationstool implementiert und damit befähigt, das freie Randwertproblem für parametrische Schmelzbadoberflächen zu integrieren.

Das Simulationstool wurde zudem erfolgreich um ein Modul für die Strukturmechanik erweitert.

Auf der experimentellen Seite werden im nachfolgenden Projektzeitraum werden Stege und Volumen an Kanten laserauftraggeschweißt, und dabei die Position der Spuren in höheren Lagen variiert, um die für das Generieren von Überhang am besten geeignete Aufbaustrategie an Kanten zu bestimmen.

Parallel dazu werden auf der modelltheoretischen Seite systematische Analysen der Spurbildung auf Kanten mit dem aktualisierten Simulationstool durchgeführt mit dem Ziel, rechnerisch im Voraus ein Prozessfenster zu bestimmen, innerhalb dessen ein robuster Aufbau mit Überhang für das LMD entlang von Bauteilkanten möglich ist.

Mit dem aktualisierten Simulationstool soll der Spuraufbau für dünnwandige Bauteile mit ortsabhängiger Bauteildicke und Torsion modelltheoretisch untersucht werden und die physikalischen Mechanismen für einen möglichen Verzug identifiziert werden und gegebenenfalls geeignete Prozessführer zu deren Vermeidung abgeleitet werden.

Der Mehrlagen Schweißbereich auf Freiformflächen wird digitalisiert als Basis für eine Offline- Bahnplanung. Die Untersuchungen werden mit dem Ziel durchgeführt, den Schweißbereich lagenmäßig für eine Freiformfläche vorherzusagen, um gegebenenfalls auf eine Digitalisierung verzichten zu können.

Veröffentlichungen in 2017

Pirch, N., Linnenbrink, S., Gasser, A., Wissenbach, K., Poprawe R., 2017. Analysis of track formation during laser metal deposition. In: Journal of Laser Applications 2017, 29, 022506; [Zugriff am 10.09.2017] Verfügbar unter: doi: <http://dx.doi.org/10.2351/1.4983231>

Pirch, N., Niessen, M., Linnenbrink, S., Gasser, A., Schleifenbaum, J.H., Poprawe, R., 2017. Influence of process strategy on distortion and residual stresses for the powder based laser metal deposition process. In:



Sonderausgabe Journal für Materialwissenschaft und Werkstoffwissenschaft.
2017

Pirch, N., Niessen, M., Linnenbrink, S., Schopphoven, T., Gasser, A.,
Poprawe, R., Schöler, C., Arntz, D. und Schulz, W., 2017. Temperature field
and residual stress distribution for laser metal deposition. In: ICALEO
Conference. Atlanta, 22. bis 26. Oktober 2017