

Teilprojekt/Arbeitskreisgruppe A11

Titel

Maß- und Formgenauigkeit beim generativen Laserstrahlaufragschweißen

Projektleitung/-bearbeitung

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

Gasser, Andres, Dr.-Ing.

Pirch, Norbert, Dr. rer. nat.

Linnenbrink, Stefanie, Dipl.-Ing.

Aufgabenstellung

In diesem Teilprojekt soll an ausgewählten Geometrieelementen Prozessverständnis bzgl. des Einfluss-Wirkzusammenhanges auf die Maß- und Formgenauigkeit beim Laserauftragschweißen (LA) generiert werden. Im experimentellen Teil werden dazu im ersten Jahr LA-Versuche auf ebenen, geneigten Oberflächen durchgeführt, und die aufgebauten Geometrien vermessen. Prozessdiagnostik wird für den Pulver-Gas-Strahl und die Laserstrahlung eingesetzt. Auf der Modellierungsseite werden die Strahlpropagation mathematisch beschrieben, ein stationäres Modell für die Partikelkinematik, ein Modell für die Pulver-Laserstrahl-Wechselwirkung und ein transientes FEM Modell für das LA erarbeitet.

Vorgehensweise

1) Experimentelle Untersuchungen

a) Versuche zum LA auf geneigten Oberflächen

Mit den Untersuchungen zum LA auf geneigten Oberflächen soll der Einfluss der Schweißrichtung in Kombination mit dem Neigungswinkel der Oberfläche auf die Spurgeometrie und die Lagendicke bestimmt werden. Dabei werden die Neigungswinkel α der Platte (Bild 1, links) von 0° bis 60° in 15° Schritten variiert. Auf diesen Platten werden zunächst Quadrate (Bild 1, Mitte) auftraggeschweißt, bei denen jeweils eine Seite Z-parallel oben geschweißt wird, eine Seite von oben nach unten, eine Seite Z-Parallel unten und eine Seite von unten nach oben. In einem zweiten Schritt werden Flächen (Bild 1, rechts) mäanderförmig auftraggeschweißt. Die Schweißstrategie wird dabei variiert. Schließlich werden Quader mit einer Kantenlänge von 10 mm geschweißt, um die durchschnittliche Lagenhöhe zu ermitteln. Die auftraggeschweißten Volumina werden metallographisch präpariert, Spur- und Lagengeometrie vermessen.

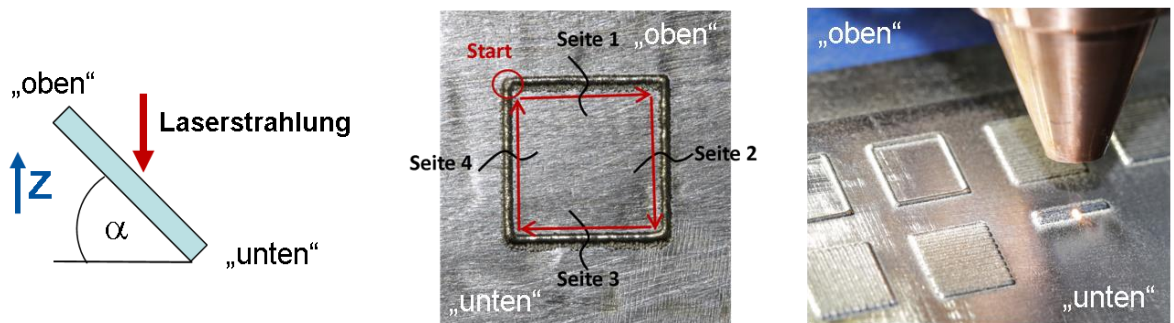


Bild 1: Auf geneigten Flächen (links) werden Quadrate (Mitte) und Flächen (rechts, Beispiel: Schweißen von oben nach unten) mittels LA auftragsgeschweißt

2) Prozessdiagnostik

Als Eingangsgrößen für die Modellrechnungen werden die Kaustik der Laserstrahlung und die aktuelle Partikeldichte des Pulvergasstrahls ermittelt. Die Partikeldichte wird ebenenweise orts aufgelöst und koaxial zur Pulvergasstrahlung (Bild 2, links) bestimmt. Dazu wird ein hauseigenes Partikelanalysegerät eingesetzt. Aus bis zu 12000 Aufnahmen je Ebene (Bild 2, rechts) wird eine orts aufgelöste Mittelung durchgeführt. Die so ermittelte Partikeldichte ergibt die Eingangsgröße für die Modellrechnungen.

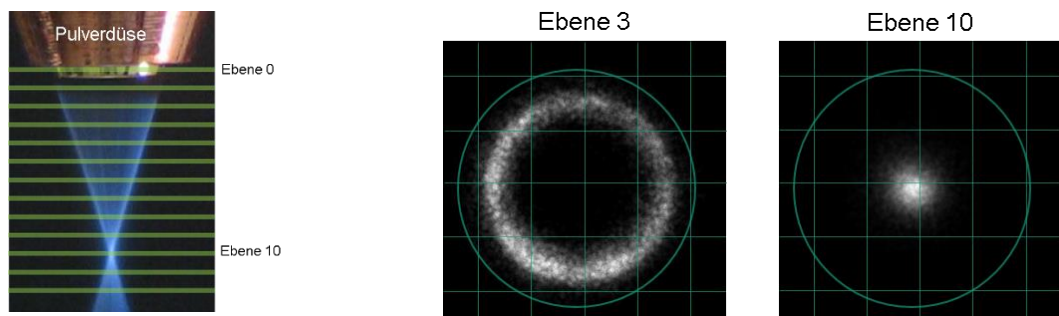


Bild 2: Die Partikeldichte wird ebenenweise koaxial zur Pulverdüse (links) gemessen, gemittelte Partikeldichten in Ebene 3 und Ebene 10 (rechts)

3) Modellrechnungen

Ein selbstkonsistentes mathematisches LMD Modell, insbesondere für geneigte Flächen, wird entwickelt und mit der FEM- Methode zeit- und orts aufgelöst integriert. Für die FEM-Methode wird ein Gradienten angepasstes Netz mit beweglichen Knoten verwendet. Da es sich um ein additives Verfahren handelt, wird nach jedem Zeitschritt das Netz geeignet angepasst. Die Vorgehensweise bei der Zeitintegration besteht aus 3 Schritten:

- I. Die Laserstrahlquelle wird bewegt, und auf Basis der vorangegangenen Bestrahlung und der aktuellen Strahlposition die Temperatur zum nächsten Zeitpunkt berechnet. Dazu wird die Wärmeleitungsgleichung für eine bewegte Quelle unter Berücksichtigung der relativen Position des Laserstrahls zum Pulverstrahlfokus, der Abschattung der Laserstrahlung durch die Partikel und die Erwärmung der Partikel durch die Wechselwirkung mit der Laserstrahlung angewendet.

$$I(\vec{x}, t) \Rightarrow I(\vec{x} + \vec{v}_v \cdot \Delta t, t + \Delta t)$$

$$T(\vec{x}, t) \Rightarrow T(\vec{x}, t + \Delta t)$$

- II. Sobald die maximale Prozesstemperatur die Schmelztemperatur überschreitet, wird die Massenzunahme durch ein Flächenintegral über die Partikeldichte über den aufgeschmolzenen Bereich berechnet.

$$T_{\max} > T_m$$

$$\Delta m = \Delta t \cdot m_p \int_{A(T(\vec{x}, t) > T_m)} \rho_{\text{Partikel}}(\vec{x}) dA$$

- III. Für den Fall einer Massenzunahme wird die Schmelzbadoberfläche neu berechnet. Dazu wird die Young- Laplace- Gleichung integriert, wobei die in der Gleichung verbleibende freie Druckkonstante so angepasst wird, dass die Massenbilanz erfüllt wird.

$$\text{Schmelzbadoberfläche : } h(x, y, t) \Rightarrow h(x, y, t + \Delta t)$$

$$\frac{\sigma}{2} \cdot \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) = \Delta p, \rho \cdot \underbrace{\int h(x, y, t + \Delta t) - h(x, y, t) dA}_{\text{Volumenzunahme}} = \Delta m$$

Ergebnisse

1) Experimentelle Untersuchungen

a) Versuche zum LA auf geneigten Oberflächen

Für das Schweißen von Spuren wurde die Abhängigkeit vom Neigungswinkel und der Schweißrichtung auf die Spurgeometrie untersucht. Exemplarisch ist dies in Bild 1 für einen Neigungswinkel von 60° gezeigt. Der Querschliff der Seite 1 (Bild 1, Mitte) eines geschweißten Quadrats ist $185 \mu\text{m}$ hoch und $816 \mu\text{m}$ breit und unterhalb der Schweißraupe sind Anhaftungen von Partikeln (Bild 3, links) zu sehen. Im Vergleich dazu ist die Schweißraupe der Seite 4 desselben Quadrats $327 \mu\text{m}$ hoch und $689 \mu\text{m}$ breit (Bild 3, rechts). Die Seite 1 wurde „Z- parallel“, und die Seite 4 „von unten nach oben“ geschweißt.

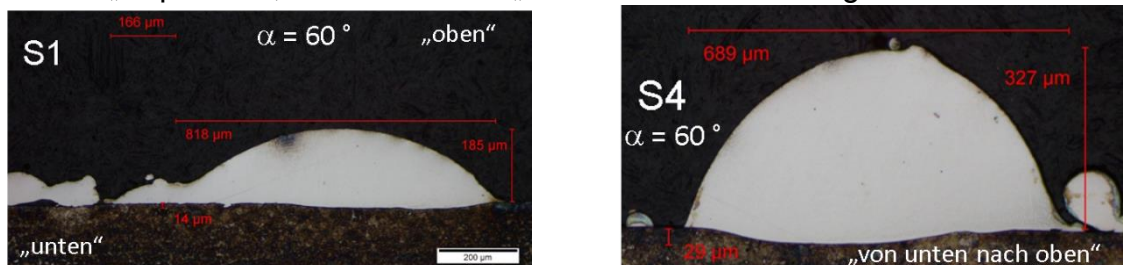


Bild 3: Querschliffe von Seite 1 (links) und Seite 4 (rechts) eines bei einem Neigungswinkel von 60° geschweißten Quadrats

2) Prozessdiagnostik

Die mittlere Partikelzahl zeigt als Funktion der Propagationsrichtung ein lokales Maximum (Bild 4, links). Das wird dadurch verursacht, dass direkt unter der Düsenöffnung nicht alle Partikel im Detektionsbereich der Kamera sind, und im Pulverfokus auf Grund von Abschattung nicht alle Partikel gezählt werden können. Die Ebene mit der maximalen Partikelanzahl wird daher als Referenz für die Modellrechnungen gewählt. Die Partikeldichte, die sich aus den Messungen ergibt, ist verrauscht und kann so nicht für die Modellierung genutzt werden. Daher werden die Daten einer Nurbs- Interpolation unterzogen, so dass die Partikeldichte als glatte Funktion zur Verfügung steht (Bild 4, rechts).

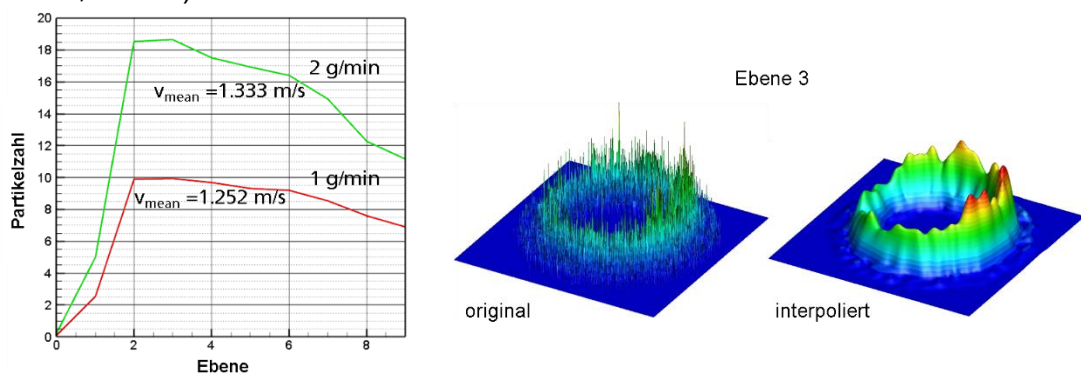


Bild 4: Die Partikeldichte weist ein lokales Maximum auf (links), die originalen Daten sind verrauscht und müssen noch interpoliert werden (rechts)

3) Modellrechnungen

Ein dreidimensionales selbstkonsistentes Modell mit freiem Randwertproblem wurde für das Laserauftragschweißen entwickelt. Damit steht ein transientes Simulationstool zur Verfügung, mit dem sowohl die Spurgeometrie als auch die lokalen Erstarrungsbedingungen als Funktion der Prozessparameter vorhergesagt werden können (Bild 5). Über ein gesondertes Modul werden als Folge der Wechselwirkung der Partikel mit der Laserstrahlung die transmittierte Laserstrahlung und die Partikeltemperatur berechnet und diese als Eingangsgrößen dem eigentlichen Simulationstool für das freie Randwertproblem zur Verfügung gestellt.



Bild 5: Berechnete Temperaturfelder in der Aufsicht und im Querschliff. Lokale Erstarrungsbedingungen wie Temperaturgradienten und Spurgeometrie sind Teil der Lösung

Zusammenfassung und Ausblick

Die Geometrie von geschweißten Spuren und Flächen wurden in Abhängigkeit vom Neigungswinkel der Grundplatte und der Schweißrichtung ermittelt.

Für die Vorhersage der Spurgeometrie und der lokalen Erstarrungsbedingungen wurde ein numerisches Modell entwickelt. Eingangsgrößen sind die aktuelle Laserstrahlkaustik und die Partikeldichte, die vorher ermittelt wurden. Im nachfolgenden Projektzeitraum wird das entwickelte Simulationstool genutzt, um den Einfluss der Flächenneigung auf den Prozess im Hinblick auf die Prozesstemperaturen und den resultierenden Spurgeometrien modelltheoretisch zu untersuchen. Die Ergebnisse werden mit den experimentellen Ergebnissen verglichen. Durch den Einsatz von Hochgeschwindigkeitsvideographie soll der LA Prozess weiter charakterisiert werden. Zusätzlich werden im nächsten Projektjahr Untersuchungen zum Laserauftragschweißen von Kanten durchgeführt.

Veröffentlichungen

Die ersten beiden Veröffentlichungen sind für Q1 und Q4 2016 geplant.