

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

Ein fundamentales Verständnis der involvierten physikalischen Prozesse bei dem pulverbasierten koaxialen Laserauftragschweißen (LA) ermöglicht durch eine fundierte Wissensbasis den Prozess gezielt zu verbessern. Daher soll in diesem Teilprojekt an ausgewählten Geometrieelementen Prozessverständnis bzgl. des Einfluss-Wirkzusammenhanges auf die Maß- und Formgenauigkeit beim Laserauftragschweißen (LA) generiert werden. Im experimentellen Teil werden dazu im zweiten Jahr Spuren und Flächen auf ebenen, geneigten Oberflächen laserauftragsgeschweißt, die Schmelzbäder mittels Hochgeschwindigkeitsvideographie beobachtet, und die aufgebauten Geometrien vermessen. Parallel zu den Experimenten wird über die Prozesssimulation die Wissensbasis zum Laserauftragschweißen vergrößert, um dem Anwender ein Werkzeug in die Hand zu geben, mit dem vorab rechnerisch ein mögliches Prozessfenster bestimmt, und somit der verbleibende experimentelle Aufwand für die konkrete Aufgabenstellung reduziert wird.

Vorgehensweise

1) Experimentelle Untersuchungen

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. Als Zusatzwerkstoff wird pulverförmiges In 718 mit einer Kornfraktion von $25 - 45 \mu\text{m}$ eingesetzt, und als Grundwerkstoffe C45 und In 718, jeweils in Plattenform. Auf diesen Platten werden Einzelspuren auftragsgeschweißt. Für jeden Neigungswinkel wird je eine Spur von unten nach oben, eine Spur von oben nach unten und eine Spur Z-parallel (Bild 1, links) geschweißt. In einem zweiten Schritt werden Flächen (Bild 1, rechts) mäanderförmig auftragsgeschweißt. Die Schweißstrategie wird dabei ebenfalls variiert. Die auftragsgeschweißten Spuren und Lagen werden metallographisch präpariert, Spur- und Lagengeometrie vermessen. Zusätzlich werden die Spuren

eingescannt, um potentielle Schwankungen in der Spurgeometrie zu erfassen (Bild 2).

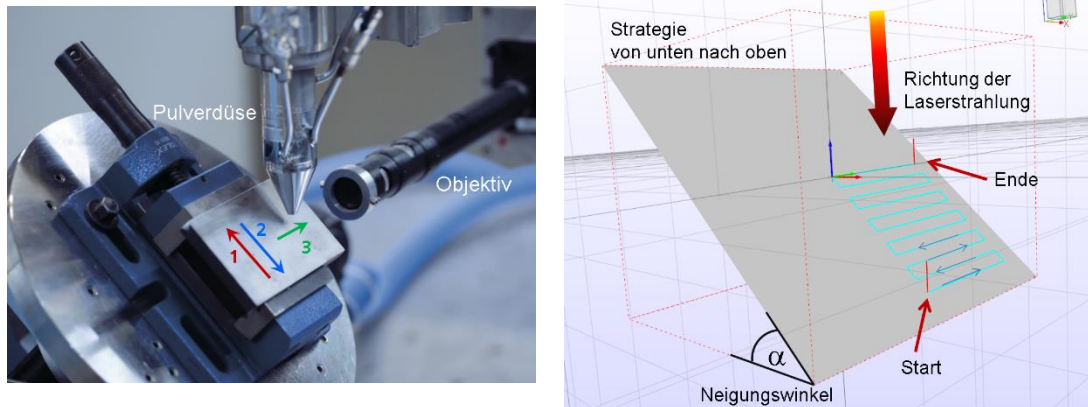


Bild 1: Auf geneigten Flächen (links: Versuchsaufbau, mit im Bild Objektiv der Hochgeschwindigkeitskamera) werden Spuren von unten nach oben (1), von oben nach unten (2) und Z-parallel (3) auftragsgeschweißt, sowie Flächen (Skizze rechts, Beispiel: Schweißen mäanderförmig von unten nach oben)

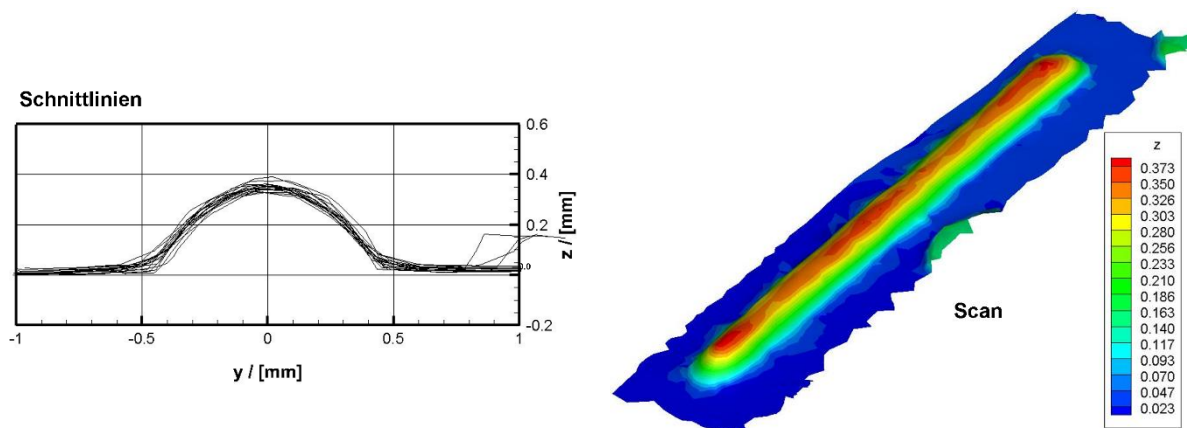


Bild 2: Analyse der Geometrie einer laserauftragsgeschweißten Spur durch optisches Scannen

2) Prozessdiagnostik

Der Laserauftragschweißprozess wird mittels Hochgeschwindigkeitsvideographie beobachtet, um die Schmelzbadgeometrien bestimmen zu können (Bild 3, links).

Als Eingangsgrößen für die Modellrechnungen werden die Kaustik der Laserstrahlung und die aktuelle Partikeldichte des Pulvergasstrahls eingesetzt. Die Partikeldichte wird dafür ebenenweise orts aufgelöst und koaxial zur Pulvergasstrahlung (Bild 3, rechts) bestimmt. Dazu wird ein hauseigenes Partikelanalysegerät eingesetzt. Aus bis zu 12000 Aufnahmen je Ebene (Bild 3, rechts) wird eine orts aufgelöste Mittelung durchgeführt. Die so ermittelte Partikeldichte ergibt eine Eingangsgröße für die Modellrechnungen.

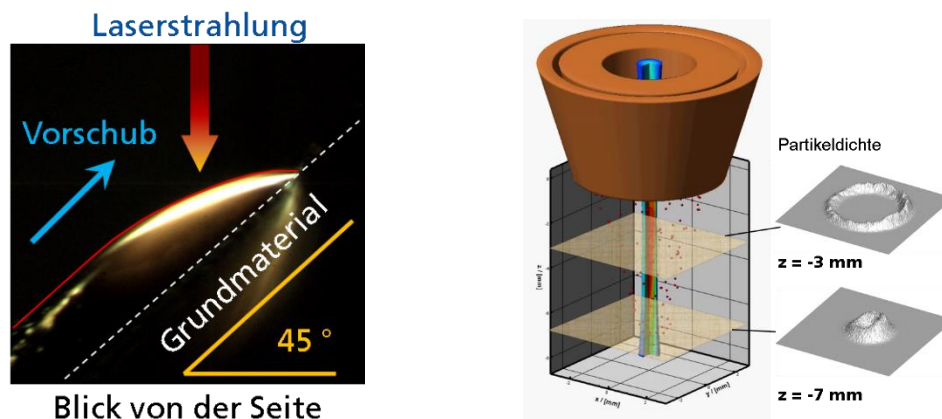


Bild 3: Prozessdiagnostik: Beobachtung eines Schmelzbads mittels Hochgeschwindigkeitsvideographie (links) und Charakterisierung des Pulver-Gas-Strahls (rechts)

3) Modellrechnungen

Die Wechselwirkung zwischen der Laserstrahlung und dem Pulver führt zu einer Reduktion der transmittierten Leistungsdichteverteilung auf dem Werkstoff und zu einer Erwärmung der Pulverpartikel, bevor diese die Schmelze erreichen. Um diese wechselseitige Einflussnahme und deren Einfluss auf das Prozessergebnis besser zu verstehen wird auf Basis der gemessenen Partikeldichte ein statistisches Modell aufgesetzt, mit dem die Abschattung der Laserstrahlung und die Partikelerwärmung orts aufgelöst bestimmt werden können.

Die ebenenweise aufgenommenen Leistungsdichteverteilungen sind mit einem Signalausgang und einem Untergrund überlagert, das durch die Approximation mit einem Super Gauss Fit (1) nach der Methode der kleinsten Quadrate entfernt wird. Diese Approximation erlaubt eine Strahlcharakterisierung gemäß Strahlradius und der Flankensteilheit n der Leistungsdichteverteilung als Funktion von z .

$$I(x, y, z) := I_o(z) \cdot \exp\left(-\left(\frac{r}{r_o(z)}\right)^{n(z)}\right) \quad \text{wobei } r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (1)$$

$$\text{Normierung: } \iint I(x, y, z) dx dy = 1$$

Das Ergebnis für die Laserstrahlkaustik (Bild 4) zeigt anhand des Verlaufes für den Exponenten $n(z)$, die Leistungsdichteverteilung unterhalb der Düsenausgangsöffnung.

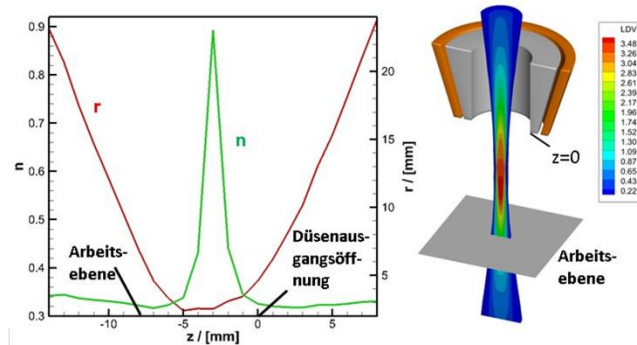


Bild 4: Radius und Polynomkoeffizient $n(z)$ entlang der Strahlachse

Für 10^6 Partikel wird die absorbierte Laserstrahlenergie entlang seiner Trajektorie orts aufgelöst berechnet, und auf Basis der Enthalpiefunktion für den Werkstoff Inconel 718 in eine Partikeltemperatur umgerechnet. Partikel, die die Verdampfungstemperatur überschreiten werden modellmäßig als Spritzer identifiziert und bleiben in der weiteren Rechnung unberücksichtigt, d.h. gehen für den Prozess verloren. Die Bedeutung der Partikeltemperatur leitet sich ab aus der Randbedingung, die sich aus der Bilanz der Wärmeströme an der Schmelzbadoberfläche ableitet (2).

$$\lambda \cdot \langle \vec{n}, \nabla T \rangle = \underbrace{\mathbf{A} \cdot \langle \vec{n}, \vec{I}_{\text{trans}} \rangle}_{\text{transmittierte LDV}} - \underbrace{\varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4}_{\text{Strahlungsverlust}} + \underbrace{\rho_{\text{Particle}} \cdot \dot{m}_P \cdot c_P \cdot (\hat{T}_{\text{Particle}} - T_S)}_{\text{Energiebedarf für den Temperaturausgleich Partikel und Schmelzbadoberfläche}} \quad (2)$$

T : Temperatur, λ : Wärmeleitfähigkeit, ρ_{Particle} : Partikeldichteverteilung
 c_P : Wärmekapazität, ε : Emissionsgrad, σ : Boltzmannstrahlungskonstante
 \vec{n} : Normalenvektor, LDV : Leistungsdichteverteilung der Laserstrahlung

Die Berechnung der Schmelzbadoberfläche ist Teil des freien Randwertproblems zum Laser. Das mathematische Modell dafür basiert auf der zeitabhängigen Wärmeleitungsgleichung (3, oben) und der Young Laplace Gleichung (3, Mitte). Die Integration der nichtlinearen partiellen Differentialgleichungen erfolgt mit der Finite-Elemente-Methode mit einer den Temperaturgradienten angepassten Vernetzung, und linearen Hexaeder Elementen. Die Temperaturabhängigkeit der Materialeigenschaften wird, soweit bekannt, in der Simulation berücksichtigt. Das Stefan Problem für den Phasenübergang fest/flüssig wird nach der Wärmekapazitätsmethode gelöst.

$$\frac{\partial(\rho \cdot c_p \cdot T)}{\partial t} - \operatorname{div}(\vec{v}_{\text{Netz}} \cdot \rho \cdot c_p \cdot T) = \operatorname{div}(\lambda \cdot \operatorname{grad} T)$$

$$\gamma \cdot \underbrace{\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right)}_{\text{mittlere Krümmung}} = p_{\text{Schmelze}} - p_{\text{out}} = \Delta p$$

und

(3)

$$\int h(x, y, t) dx dy = V_{\text{Spur}}(t)$$

γ : Grenzflächenspannung ρ : Dichte, \vec{v}_{Netz} : Netzgeschwindigkeit
 p_{Schmelze} : Druck in der Schmelze, p_{out} : Atmosphärendruck, h : Schmelzbadoberfläche

Wenn sich eine Schmelze gebildet hat, wird nach jedem Zeitschritt der Volumenzuwachs durch die zugeführten Partikel durch eine Integration der Partikeldichte über den Flächenbereich oberhalb der Schmelztemperatur durchgeführt. Mithilfe der Young Laplace Gleichung wird auf Basis des aktualisierten Schmelzvolumens eine neue Schmelzbadoberfläche berechnet, unter Bezug auf die Massenbilanz, die besagt, dass das Integral über die Spurgeometrie dem aktuellen Wert des Volumens der Spurgeometrie entsprechen muss. Nachfolgend werden die Knoten des Finite-Elemente Netzes so verschoben, dass eine Kontur angepasste Vernetzung vorliegt. Die Bewegung der Knoten führt zu einer zeit- und ortsabhängigen Netzgeschwindigkeit, die als konvektiver Beitrag in der Wärmeleitungsgleichung berücksichtigt wird.

Ergebnisse

1) Experimentelle Untersuchungen

Versuche zum LA auf geneigten Oberflächen

Für das Schweißen von Flächen wurde unter anderem die Abhängigkeit vom Neigungswinkel und der Schweißrichtung auf die Lagengeometrie untersucht. Exemplarisch ist dies für einen Neigungswinkel von 45 ° und der Materialkombination In 718 auf In 718 gezeigt. Die in der oberen Hälfte von Bild 5 dargestellte Fläche (Fläche 1) wurde mäanderförmig von unten nach oben laserauftraggeschweißt (Strategie 1), die in der unteren Hälfte dargestellte Fläche (Fläche 2) ebenfalls mäanderförmig allerdings von oben nach unten (Strategie 2). Der Vergleich der Querschliffe der beiden Flächen zeigt, dass Fläche 1 höher ist als Fläche 2 (329 µm zu 304 µm) und Fläche 1 eine kleinere Aufmischung hat als Fläche 2 (95 µm zu 138 µm).

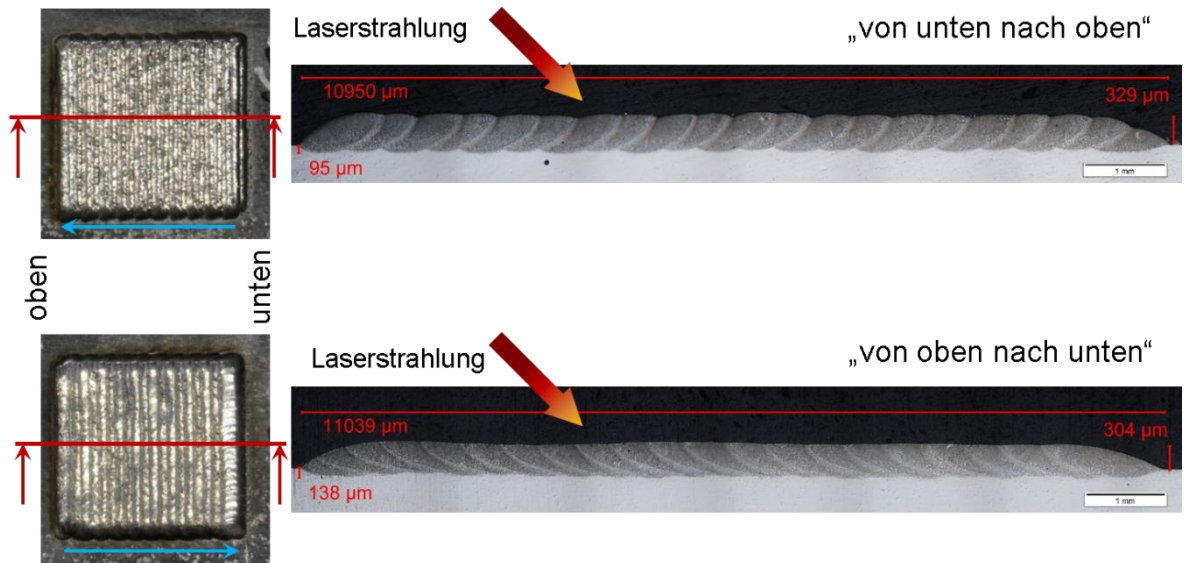


Bild 5: Vergleich von Laserauftragsschweißten Flächen, wie geschweißt (Aufsicht, links) und im Querschliff (rechts), In 718 auf In 718, Neigungswinkel 45° , Strategie Mäanderförmig von unten nach oben (oben) und von oben nach unten (unten)

2) Prozessdiagnostik

Mittels der während der in situ erfassten Hochgeschwindigkeitsaufnahmen (Bild 6) können die Schmelzbadgeometrien ausgewertet, und später mit den Modellrechnungen verglichen werden. Für die Materialkombination In 718 auf C45 ergibt sich beispielsweise für Z- parallele Spuren und einer Beobachtungsrichtung bei der das Schmelzbad auf den Betrachter zuläuft, dass die Schmelze nicht der Schwerkraft zu folgen scheint (Bild 6, rechts). Die Ursache dafür kann mit der Oberflächenspannung der Schmelze erklärt werden.

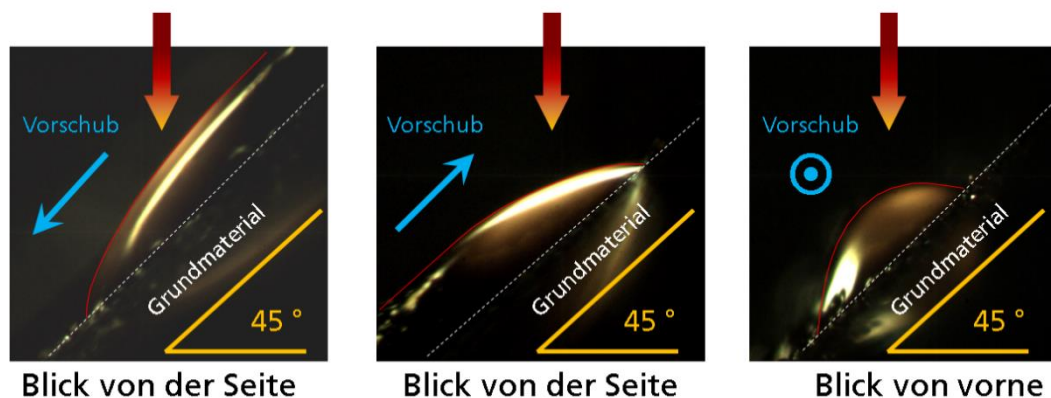


Bild 6: Laserauftragsschweißen von Einzelspuren von oben nach unten (links), von unten nach oben (Mitte) und Z- parallel (rechts), Prozessbeobachtung mittels Hochgeschwindigkeitsvideographie

3) Modellrechnungen

Aus modellierten Einzelaufnahmen von den Pulverpartikeln wird durch eine Mittelung der Abschattung der Partikeln von 10^6 solcher Einzelbilder die Transmissionsfunktion (Bild 7) berechnet. Die Abschattung bzw. Transmission (T) der Laserstrahlung hängt ab von der Distanz der Prozessebene zur

Düsenauslassöffnung (Bild 7, links: 6 mm unter der Auslassöffnung, Mitte: 7 mm unter der Auslassöffnung und rechts: 8 mm unter der Auslassöffnung) und weist z.B. für einen Abstand von $z = -8$ mm eine Reduktion der Strahlleistung im Strahlzentrum von 16 % auf (Bild 7, rechts).

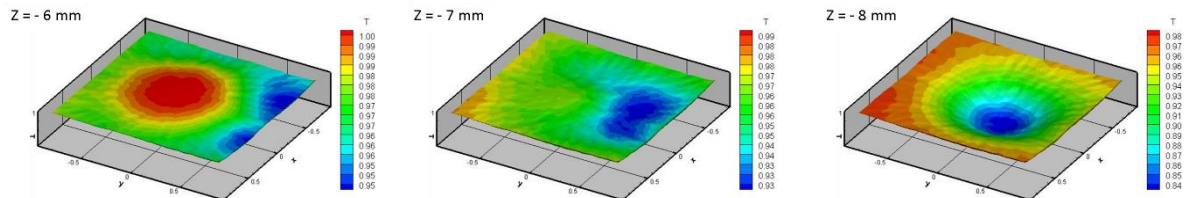


Bild 7: Transmissionsfunktion für die Laserstrahlung für drei Ebenen in unterschiedlichem Abstand von der Düsenöffnung, 6 mm unter der Düsenöffnung (links); 7 mm unter der Düsenöffnung (Mitte) und 8 mm unter der Düsenöffnung (rechts, Bearbeitungsebene)

Der Vergleich der Spurgeometrien in der Seitenansicht von Modell (Bild 8, rechts) und anhand der Hochgeschwindigkeitsaufnahmen vom Experiment (Bild 8, links und Mitte), zeigt gute Übereinstimmungen. Im Hochgeschwindigkeitsvideo kann eine Variation der Krümmung der Schmelzbadoberfläche während des Schweißens beobachtet werden (Bild 8, links und Mitte)

Schmelzbad Seitenansicht für zwei Zeitpunkte

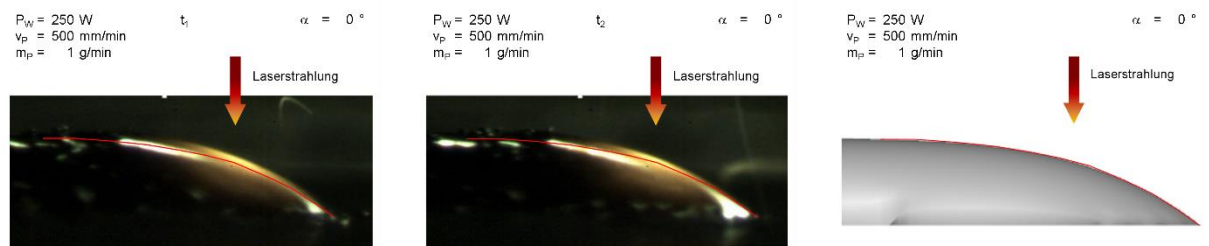


Bild 8: Vergleich der modelltheoretisch (rechts) und der experimentell (links und Mitte) ermittelten Spurgeometrien in der Seitenansicht

Zusammenfassung und Ausblick

Spuren und Flächen wurden auf unterschiedlich geneigten Flächen laserauftraggeschweißt, und in situ die Schmelzbäder mittels Hochgeschwindigkeitsvideographie erfasst. Die laserauftraggeschweißten Spuren und Flächen wurden zusätzlich metallographisch untersucht, und deren Geometrie dokumentiert.

Ein dreidimensionales Modell für das Pulver basierte Laserauftragsschweißen mit koaxialer Pulverzufuhr wurde abgeleitet. Das Modell berücksichtigt die Wechselwirkung der Laserstrahlung mit den Pulverpartikeln. Die transmittierte Laserstrahlung, die mittlere Partikeltemperatur und der Pulverwirkungsgrad sind Teile der Lösung. Die Geometrie der Schweißspur wird selbstkonsistent berechnet, und zeigt eine sehr gute Übereinstimmung mit experimentell ermittelten Ergebnissen von der Geometrie der Schweißspur.

In Zukunft wird das Modell in einer Weise erweitert, die es gestattet auch von der Geometrie her gesehen komplexere Aufgabenstellungen zu bearbeiten. Dazu soll die sogenannte „Immersed boundary method“ von Gornak verwendet werden. Zurzeit ist die Modellierung beschränkt auf Schweißraupengeometrien mit einem Kontaktwinkel kleiner 90 Grad entlang der Dreiphasenlinie.

Veröffentlichungen in 2016

Analysis of track formation during laser metal deposition; Icaleo 2016

Analyse der Spurbildung beim Laserauftragsschweißen; Simulationsforum Schweißen und Wärmebehandlung 2016, Tagungsband