

Teilprojekt A 11

Titel

Maß- und Formgenauigkeit beim generativen Laserstrahl-
Auftragschweißen

Projektleitung/-bearbeitung

Projektleitung: Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing.

Johannes Henrich Schleifenbaum

Projektbearbeitung: Bold, Marie, M. Sc.; Zielinski, Jonas, M. Sc.

Lehrstuhl für Digitale Additive Produktion (DAP), RWTH Aachen
University

Aufgabenstellung

Herausforderung und zentrale Aufgabenstellung im Teilprojekt A11 ist die Erhöhung der geometrischen Präzision beim Laserauftragsschweißen (LMD). Im Berichtszeitraum wurde das Augenmerk auf die im Prozess entstehenden Spannungen und Verzüge gerichtet. Ziel ist, die komplexen Wechselwirkungen zwischen den Temperaturzyklen, den beim Erstarren entstehenden Spannungen und dem resultierenden Verzug zu verstehen und vorherzusagen. Langfristig ermöglicht dies die spannungsarme Fertigung von komplexen Geometrien. Durch die Reduktion von inneren Spannungen werden Bauteile robuster gegenüber Belastungen / dynamischer mechanischer Beanspruchung.

Weiterhin wurde die im LMD entstehende Mikrostruktur anhand der Micress Software berechnet und mit experimentellen Ergebnissen verglichen.

Vorgehensweise

Die Temperaturverläufe, die entstehenden Spannungen und die Verzüge wurden experimentell und mittels Simulationen ermittelt. Um den Einfluss der Scanstrategie auf die genannten Größen zu bestimmen, wurde eine einlagige, quadratische (Kantenlänge 50 mm) Geometrie gewählt. Die verwendeten Belichtungsstrategien sind: 1) Spirale (nach innen), 2) Spirale (nach außen) und 3) bidirektionales Rastern.

Experimentell wird die Temperatur in situ mit einer Thermokamera auf der Unterseite des Substrats bestimmt. Durch diese Messmethode wird das Fernfeld der im Prozess vorliegenden Temperaturen bestimmt. Der Verzug wird ebenfalls in situ an der Unterseite des Substrats mittels digitaler Bild Korrelation (digital image correlation; DIC) gemessen. Die im Material anliegenden Spannungen werden außerdem post mortem mittels Specklemuster-Interferometrie bei der Bohrlochmethode bestimmt.

Die Simulation basiert auf einem thermo-mechanischen Modell des LMD, bei dem die Belichtungspfade stückweise abgebildet werden. Die Plastizität wird durch das van-Mises-Modell beschrieben. Die Intensitätsverteilung der Laserstrahlung wird als homogen angenommen. Dies ist nötig, da bei einer heterogenen Intensitätsverteilung die Rechenzeiten aufgrund der Bauteilgröße und der thermo-mechanischen Kopplung des Problems zu groß werden.

Weiterhin werden reduzierte Modelle wie „Inherent Strain“ und die „Shrinkage Force“ Methode erprobt.

Ergebnisse

Die Prozesstemperaturen in Experiment und Simulation weisen ähnliche charakteristische Verläufe auf, wobei die Temperatur im Experiment etwas breiter gestreut ist. Dies deutet auf eine höhere als die in der Simulation eingesetzten Temperaturleitzahl hin. Die Scanstrategien führen zu unterschiedlichen Temperaturverläufen, wobei bei der Spirale nach innen (1) die höchsten Temperaturen erreicht werden (siehe Abbildung 2).

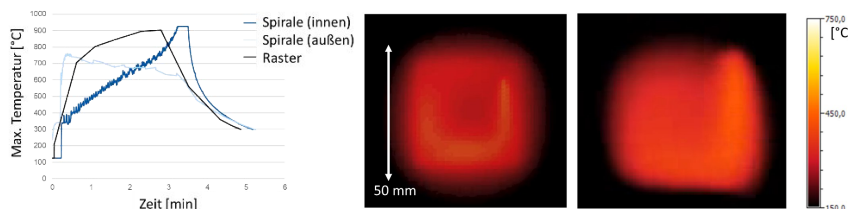


Abbildung 1 Links: Gemessener Temperatur-Zeit Verlauf an der Substratunterseite für die drei Scanstrategien; Mitte: Simulierter Temperaturverlauf für „Spirale nach innen“; Rechts: gemessenes Temperatursignal für „Spirale nach innen“.

Der entstehende Verzug wird durch den Temperaturverlauf und die Steifigkeit der bereits gefertigten Struktur bestimmt. Für die Spiralstrategien (1, 2) ist der Verzug nahezu symmetrisch, während durch die bidirektionale Rasterstrategie (3) eine

ausgezeichnete Richtung existiert, welche auch im Verzugsprofil sichtbar ist (siehe Bild Abbildung 2).

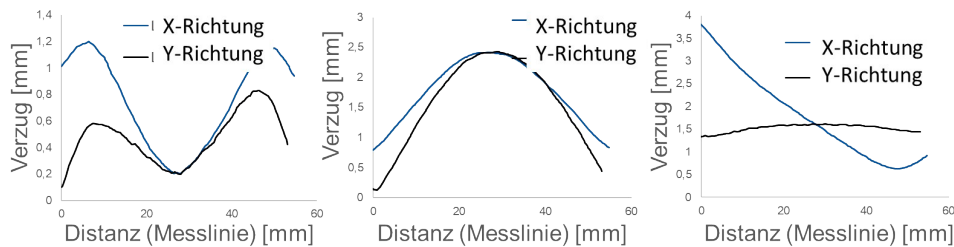


Abbildung 2 Verzugsmessung entlang X- und Y-Achse durch den Mittelpunkt des Substrats; an der Unterseite gemessen. 1) Spirale nach innen, 2) Spirale nach außen, 3) Bidirektionales Rastern.

Das thermo-mechanische Modell ist aktuell in der Testphase. Die resultierenden Dehnungen sind aktuell zu klein (Bild Abbildung 3). Nach eingehender Analyse liegt aktuell noch ein Fehler bei der Auswertung der Plastizität vor.

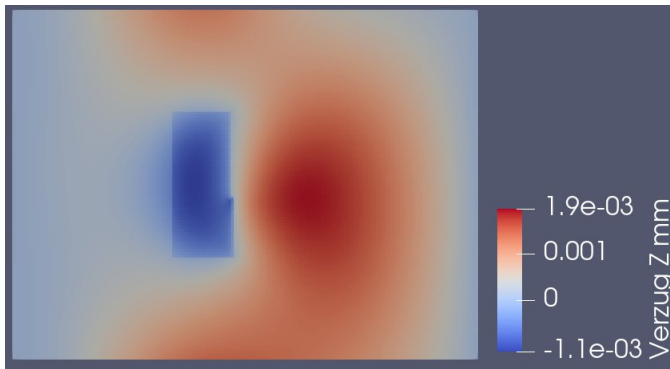


Abbildung 3: Verzugsergebnis der thermo-mechanischen Simulation. Dargestellt ist der Verzug in z-Richtung. Das charakteristische „nach oben biegen“ in dem noch zu bearbeitenden Bereich ist erkennbar. Der Verzug kann aktuell noch nicht quantifiziert werden, da die Simulation noch in der Testphase ist.

Die Simulation der Mikrostruktur liefert einen Dendritenarmabstand, der in der Größenordnung mit den Daten aus dem Experiment übereinstimmt. Dennoch sind in der Simulation tertiäre Dendriten zu erkennen, welche im Experiment nicht nachgewiesen werden konnten. Dieser Umstand muss näher untersucht werden.

Zusammenfassung und Ausblick

Das volle thermo-mechanischen Simulationsmodell sowie der reduzierte Ansatz über die Shrinkage Force Methode sind für einfache, leicht geometrische beschreibbare Strategien implementiert. Beide Ansätze müssen jedoch noch ausgiebig überprüft und anschließend validiert werden. Vorläufige Ergebnisse zeigen, dass die „Shrinkage Force“ Methode um

einige Größenordnungen schneller ist als das volle Modell und bei kleinen Testgeometrien den Verzug in der gegebenen Größenordnung reproduzieren konnte.

Sobald die Spannungen und Verzüge ausreichend genau vorhergesagt werden können, wird schrittweise die Komplexität bzw. Dünnwandigkeit der Geometrien erhöht. Ziel ist bspw. die spannungs- und verzugsarme Herstellung von einzelnen Blisk-Schaufeln aus dem Turbomaschinenbau.

Veröffentlichungen

Bold, M.; Linnenbrink, S.; Pirch, N.; Gasser, A.; Mund, J.; Schleifenbaum, J. H.: Powder Based Laser Material Deposition on Edges, Journal of Laser Applications: JLA 32(3), Seiten/Artikel-Nr.:032001, DOI [10.2351/7.0000095](https://doi.org/10.2351/7.0000095)

J. Zielinski, M. Bold, H. Kruse. J.H. Schleifenbaum; Melt Pool Formation and Out-of-Equilibrium Solidification during the Laser Metal Deposition Process, 978-3-030-70331-8, EMPORIA 2020, LNME