# Prozesscharakterisierung des Laserstrahlauftragschweißens an Al-Si-Legierungen zum Zweck der Instandsetzung von Gussteilen

Michael Güpner<sup>1</sup>, Tristan Drawert<sup>1</sup>, Jens Bliedtner<sup>1</sup>, Heiko Lange<sup>2</sup> <sup>1</sup>Ernst-Abbe-Hochschule Jena, Carl-Zeiss-Promenade 2, 07745 Jena <sup>2</sup>ICS Industrieleistungen GmbH, Am Schlifter 5, 06571 Roßleben

Al-Si-Legierungen werden bevorzugt zur Fertigung von Druckgusserzeugnissen eingesetzt. Die Einsatzbereiche für diese sind sehr vielschichtig und erstrecken sich über viele Branchen, wie bspw. die Automobil- und Luftfahrtindustrie. Wegen der komplexen Prozessführung und der Vielzahl an Einflussgrößen unterliegt der Gussprozess mittleren Ausschussraten von ca. 10 %. Dabei führen kleinste Defekte, wie Poren oder Gestaltabweichungen im Bereich von Dichtflächen dazu, dass die Funktionalität des Bauteils nicht mehr gegeben ist. In diesem Fall wird das Bauteil wieder der Schmelzebeschickung zugeführt und erneut gegossen. Daraus resultieren Leerzeiten in nachgelagerten Prozessschritten oder eine Überproduktion. Ein Ansatz um dies zu umgehen, stellt die Instandsetzung der Defektstellen mittels automatisiertem Laserauftragschweißen dar. In der vorliegenden Veröffentlichung erfolgte dazu eine umfassende Prozesscharakterisierung. Prozessgrenzen, die Optimierung des Aufmischungsgrades und die Adaption des Energieeintrages beim Volumenaufbau wurden untersucht.

## 1. Einleitung

Der Druckguss von Aluminiumlegierungen stellt ein industriell etabliertes Fertigungsverfahren dar. Der Einsatzbereich druckgegossener Bauteile erstreckt sich über eine Vielzahl von Branchen, wie bspw. der Luftfahrt- und der Automobilindustrie. Auf den Druckgussprozess wirken viele Einflussgrößen, woraus sich eine anspruchsvolle Prozessführung ergibt. Trotz der beachtlichen Historie des Prozesses treten auch in der heutigen Zeit Prozesschwankungen auf, die zu mittleren Ausschussraten von ca. 10 % führen. In Anlaufphasen von neuen Gusserzeugnissen kann diese Quote weiter höher liegen.

Meist führen schon kleinste Gießfehler wie Oberflächendefekte, Poren oder Lunker, bspw. im Bereich von Dichtflächen, dazu das die geforderte Funktionalität des Bauteils nicht mehr gegeben ist. In diesem Fall wird das Gusserzeugnis der Schmelzebeschickung rückgeführt und komplett neu gefertigt. Die Folge sind unwirtschaftliche Leerzeiten in nachgelagerten Prozessschritten, die bspw. durch eine Überproduktion gepuffert werden müssen. Ein alternativer Ansatz wird in der vorliegenden Veröffentlichung mit der Reparatur der meist lokal begrenzten Defektstelle durch das pulverbasiertes Laserauftragschweißen vorgestellt. Durch den Einsatz des additiven Fertigungsverfahrens kann das defekte Bauteil durch die Instandsetzung wieder nutzbar gemacht werden und die Wertschöpfungskette weiter durchlaufen.

## 2. Grundlagen und Ansatz

Zur Bestimmung eines geeigneten Arbeitspunktes für das Prozessieren von Al-Si-Legierungen wurden im Rahmen einer Prozesscharakterisierung die zentralen unmittelbaren Einflussgrößen wie der Pulvermassestrom, die Laserleistung, die Vorschubgeschwindigkeit sowie der Strahldurchmesser variiert [1]. Der Einfluss der mittelbaren Prozessgrößen wie der Intensität und der Streckenenergie sollte untersucht werden, da diese ein Maß für die thermische Belastung des Bauteils sind, bzw. die Strahleinkopplung [1] maßgeblich beeinflussen. Als Qualitätsmerkmale wurden eine niedrige Porosität und ein Aufmischungsgrad kleiner 30 % ausgewählt. Al-Werkstoffe neigen auf Grund ihrer thermo-physikalischen Eigenschaften zu einer hohen Durchmischung, sodass übliche Aufmischungsgrade von 5 bis 10 %, wie bspw. bei Stahlwerkstoffen, nicht erreicht werden [2].

Da vorzugsweise dünnwandige Strukturen mit minimalen Breiten von 1,5 mm applikationsseitig aufgebaut werden sollten, wurde die folgenden Anforderungen an die Qualität und Abmessung der Einzelspur gestellt:

- Aufmischungsgrad AG < 30 %
- Spurbreite B > 2 mm
- Spurhöhe H > 0,5 mm

## 3. Versuchsaufbau und -durchführung

Für die experimentelle Versuchsdurchführung wurde ein fasergeführtes Scheibenlasersystem der Firma Trumpf GmbH mit einer maximalen Ausgangsleistung von 4 kW genutzt. Mit der robotergeführten Bearbeitungsoptik BEO D70 ist es möglich den Strahldurchmesser zwischen 0,4 und 7 mm im Arbeitsabstand der koaxialen Dreistrahlpulverdüse anzupassen. Während der Charakterisierung des Laserauftragschweißprozesses wurden Strahldurchmesser zwischen 1,6 und 2,7 mm betrachtet.

Zur Bestimmung des Prozessfensters für Einzelspuren wurde die Laserleistung über das gesamte Spektrum der Strahlquelle variiert, was zu Intensitäten von 1,7·10<sup>4</sup> bis 2·10<sup>5</sup> W/cm<sup>2</sup> führte. Wegen der sehr hohen Reflektivität vom 91 % [3] und der enormen Differenz zwischen Schmelz- und Verdampfungstemperatur von 1858 K [4, 5] stellt sich ein Tiefschweißprozess bei Al-Si-Legierungen erst ab deutlich höheren Intensitäten ein. In [6] sind Intensitäten für den Tiefschweißprozess von AlSi10Mg mit 5,2·10<sup>6</sup> bis 3,2·10<sup>7</sup> W/cm<sup>2</sup> angeben. Daher fanden alle durchgeführten Experimente im, für das Laserauftragschweißen zu bevorzugendem, Regime des Wärmeleitungsschweißens statt. Weitere relevante Daten der verwendeten Systemtechnik sind in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Charakteristische Daten des Lasersystems
---

Strahlquelle	Trumpf TruDisk 4002
Wellenlänge λ [μm]	1,03
Maximale Leistung P [W] (gemessen)	4000
Prozessierte Strahldurchmesser d [mm] (gemessen)	1,6; 2,1; 2,7
Prozessierte Intensitäten I [W/cm <sup>2</sup> ]	$1,7.10^4 - 2.10^5$
Beugungsmaßzahl M <sup>2</sup> (gemessen)	25
Rayleighlänge z <sub>r</sub> [mm] (gemessen)	4,3

Als Substratmaterial wurden AlSi10Mg-Masseln in 10 mm dicke Platten vereinzelt, plangefräst und vor dem Prozessieren sandgestrahlt. Als Schweißzusatzwerkstoff kam pulverförmiges AlSi10Mg mit einer Kornfraktion von 40 bis 150 µm zum Einsatz. Substrat- und Pulverwerkstoff wurden einer Materialanalyse (Tabelle 2) unterzogen und erfüllen von der chemischen Zusammensetzung her die Spezifikationen für AlSi10Mg nach [7].

Tabelle 2: Gemessene chemische Zusammensetzung von Substrat- und Pulverwerkstoff

Element	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ti
Substrat	9,96	0,1	<0,001	0,03	0,41	0,02
Pulver	10,42	0,21	<0,01	0,005	0,42	0,11

In einem nächsten Schritt wurde der Pulvermassestrom bei verschiedenen Tellerdrehzahlen der Fördereinheit zur Bestimmung der Förderkennlinie ermittelt. Mit dem genutzten Systemsetup können Pulvermasseströme zwischen 1 und 12 g/min generiert werden. Zwischen Förderkennlinie und Tellerdrehzahl ergibt sich, wie zu erwarten, ein linearer Zusammenhang. Die Förderrate beträgt 1,5 Gramm je Umdrehung der Tellereinheit.

Das Basisgeometrieelement beim additiven Strukturaufbau stellt im Falle des Laserauftragschweißens die Einzelspur dar. Durch die überlappende, mehrlagige Anordnung mehrerer Einzelspuren können Volumina für die Reparatur von Al-Si-Gusserzeugnissen generiert werden. Daher wurde im Rahmen der Versuchsdurchführung zunächst eine Charakteristik und Optimierung der Einzelspur vorgenommen. Die Zielstellung bestand in der Ermittlung eines Arbeitspunktes für den dreidimensionalen Volumenaufbau mit den in Gliederungspunkt 2 formulierten Eigenschaften. Alle Parametersätze wurden 4-fach wiederholt. Die in der Auswertung dargestellten Datenpunkte sind arithmetische Mittelwerte. Zur Entwicklung der Leistungsreduzierung wurde die Temperatur pyrometrisch während des Schweißprozesses detektiert. Der Messfleck des Pyrometers wurde ca. 5 mm vorlaufend vor der Mitte des Schmelzbades in Schweißrichtung positioniert. Für den mehrlagigen Aufbau wurde eine unidirektionale Bearbeitungsstrategie gewählt. Der Spurüberlapp betrug je nach Zielgeometrie 20 bis 30 %, die Zustellung je Lage wurde auf 70 % der Einzelspurhöhe eingestellt. An den generierten Proben erfolgte eine Mikropräparation im Querschliff zur lichtmikroskopischen Vermessung der charakteristischen Flächen und Längen der aufgetragenen Struktur.

#### 4. Ergebnisse und Diskussion

### 4.1 Charakteristik Einzelspuren

Zu Beginn der Charakterisierung der Einzelspuren wurden zur ersten Eingrenzung eines Arbeitspunktes fünf Streckenenergien zwischen 60 und 120 J/mm ausgewählt. Innerhalb jeder Streckenenergie wurde die Laserleistung zwischen 1000 und 4000 W variiert. Zum Konstanthalten der jeweiligen Streckenenergie wurde die Vorschubgeschwindigkeit und der Pulvermassestrom angepasst. Die Streckenmasse und der Strahldurchmesser wurden über den Umfang der ersten Versuchsreihe konstant gehalten.



Abbildung 1: Aufmischungsgrad in Abhängigkeit der Laserleistung und der Streckenenergie bei konstanter Streckenmasse und einem Strahldurchmesser von 1,6 mm

Mit steigender Laserleistung wächst der Aufmischungsgrad nicht linear auf Werte von bis zu 65 % an. Da die Versuche mit einem gleichbleibenden Strahldurchmesser von 1,6 mm durchgeführt wurden, zeigt der Aufmischungsgrad eine Abhängigkeit von der eingestrahlten Intensität (Abb. 1). Die Variation der Streckenenergie bei konstanter Intensität und Leistung zeigte hingegen einen vergleichsweise geringen Einfluss auf den Aufmischungsgrad. Folglich wurde die Streckenenergie auf einem mittleren Wert von 90 J/mm für die weiteren Versuche festgelegt. Die formulierte Zielstellung eines Aufmischungsgrades kleiner 30 % wurde ausschließlich für die geringste Leistung bzw. Intensität, allerdings bei zu geringen Spurbreiten von ca. 1,5 mm, erreicht.



Abbildung 2: Spurbreite und Einschmelztiefe in Abhängigkeit der Laserleistung und des Strahldurchmessers bei konstanter Streckenmasse und Streckenenergie

Daher wurden in einem nächsten Schritt geringere Intensitäten bei Leistungen von 1 bis 1,5 kW und bei größeren Strahldurchmessern von 2,1 und 2,6 mm betrachtet, um die geforderten Zielparameter für den Volumenaufbau zu erreichen.



Abbildung 3: Aufmischungsgrad in Abhängigkeit der Streckenmasse bei konstanter Streckenenergie (90 J/mm) und Strahldurchmesser (2,7 mm)

Die Spurbreite und die Tiefe der Einschmelzzone wachsen im Leistungsbereich von 1 bis 1,5 kW grundsätzlich sehr stark an (Abb. 2). Die Spurbreite lässt sich durch die Vergrößerung des Strahldurchmessers auf Werte von 2 bis 2,5 mm steigern. Infolge der geringen Dichte und der sehr hohen Wärmeleitfähigkeit des Werkstoffs ergibt sich eine sehr hohe Temperaturleitfähigkeit [4, 5]. Diese bewirkt einen sehr effizienten Wärmetransport im Bauteil, sodass trotz der Reduzierung der eingestrahlten Intensität die Schmelzzone an Tiefe und auch an Breite gewinnt. Folglich steigt der Aufmischungsgrad auf Werte größer 30 % an. Hieraus ergibt sich ein Zielkonflikt zwischen Spurbreite und Aufmischungsgrad, der durch die Anpassung der Streckenmasse behoben werden kann.

Um die Spurbreite beizubehalten und den avisierten Aufmischungsgrad einzustellen, wurde, bei einer Leistung von 1250 W und dem größten Strahldurchmesser von 2,7 mm, die Streckenenergie und die Intensität konstant gehalten und die Streckenmasse durch den Pulvermassestrom angepasst (Abb. 3).



Abbildung 4: Querschliff einer Probe mit erreichten Zielparametern für Demonstratorstruktur (AG = 29 %; B = 2,1 mm; H = 0,9 mm)

Die Steigerung des Pulvermassestroms bewirkt einen Wechselwirkungszone, Volumenzuwachs in der wodurch die Tiefe der Einschmelzzone reduziert und die Höhe der aufgetragenen Schicht gesteigert wird. Der Prozess gewinnt an Effizienz und Qualität, da mit der Reduzierung des Aufmischungsgrades ein größerer Anteil der bereitgestellten Leistung für den Volumenaufbau genutzt werden kann. Durch das Prozessieren mit geringen Leistungen, größeren Strahldurchmessern und der Adaption der Streckenmasse konnten die formulierten Zielparameter für die Einzelspur hinsichtlich Spurbreite, Spurhöhe und Aufmischungsgrad erreicht werden (Abb. 4).

### 4.2 Prozessentwicklung Volumenauftrag

Als Demonstrator für den Strukturaufbau wurde die Unterschale eines Steuerblocks für ein Automatikgetriebe ausgewählt. Das Bauteil ist geprägt von vielen dünnwandigen Strukturen, die an der Oberseite eine Dichtfläche zum Deckel des Unterteils bilden müssen. Im Bereich einer dieser Wandungen wurden beim Planfräsen Poren freigelegt. Die 4 mm breite Wandung musste auf einer Länge von 50 mm und einer Tiefe von 4 mm instandgesetzt werden (Abb. 7a).



Abbildung 5: Aufbau eines Quaders a) bei konstanter Leistung und b) mit Leistungssteuerung

In einem ersten Versuch wurden, auf gefertigten Dummy-Strukturen, 5 Lagen bestehend aus jeweils 3 überlappenden Spuren bei einer konstanten Laserleistung von 1250 W aufgetragen. Das Schweißergebnis ist in Abbildung 5a dargestellt und weicht deutlich von einer endkonturnahen Quaderform ab. Die Temperaturmessung zeigte, dass während des Strukturaufbaus von Lage zu Lage bis zu 400 °C Restwärme im Bauteil und der aufgetragenen Struktur verbleiben.



Abbildung 6: Prozesssteuerung: Temperatur und Leistung in Abhängigkeit der Anzahl der aufgetragenen Spuren

Der entstehende Wärmestau wird durch die Stegstruktur verstärkt, da die dreidimensionale Wärmeleitung eingeschränkt wird. Dieser zusätzliche Anteil an Energie nimmt in Form von schnell anwachsenden Einschmelztiefen und Schmelzbadbreiten Einfluss auf den Auftragschweißprozess und die Geometrie der Struktur. In Folge des größeren Schmelzbades kann ein erhöhter Anteil des bereitgestellten Pulvers vom Schmelzbad aufgefangen werden, wodurch das aufgetragene Volumen von Lage zu Lage massiv anwächst. Durch die sehr große Differenz zwischen Schmelz- und Verdampfungstemperatur des Werkstoffs kann die Schmelze massiv überhitzen ohne den Aggregatszustand zu wechseln.



Abbildung 7: Demonstrator – Partielle Instandsetzung des Steuerblocks eines Automatikgetriebes a) spanend vorbearbeitet Defektstelle und b) aufgetragenes Volumen

Da der prozessierte Werkstoff äußerst sensibel schon auf geringfügige Änderungen der eingekoppelten Energie reagiert, muss ab der zweiten Spur des Auftrags die akkumulierte Wärme durch die Reduzierung der Laserleistung kompensiert werden. Im Rahmen der Untersuchungen konnte eine geeignete, nichtlineare und strukturspezifische Leistungssteuerung von 1250 auf ca. 840 W entwickelt werden (Abb. 6). Die Anzahl der Spuren je Lage wurde von 3 auf 2 Spuren reduziert. Durch die gezielte Reduzierung der Laserleistung konnte schließlich ein homogener, endkonturnaher Schichtaufbau geringer Porosität am realen Bauteil generiert und der Laserauftragschweißprozess als geeignetes Instandsetzungsverfahren für Al-Si-Gusserzeugnisse eingesetzt werden (Abb. 7b).

## 5. Zusammenfassung

Das pulverbasierte Laserauftragschweißen ist ein geeignetes additives Fertigungsverfahren für die Instandsetzung von Al-Si-Gusserzeugnissen. Die Haupteinflussgröße stellt die Intensität dar. Kleine Laserleistungen und größere Strahldurchmesser sind anzuwenden, um geringe Aufmischungsgrade bei entsprechenden Spurbreiten einzustellen. Der Aufmischungsgrad kann über den Pulvermassestrom feinangestimmt werden. Der Strukturaufbau erfordert wegen der thermo-physikalischen Eigenschaften des Werkstoffs eine geometrieangepasste Leistungsreduzierung.

## Danksagung

Die Ergebnisse wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens ZF4039609FH7 gewonnen, das mit finanziellen Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert wurde. Dafür sei an dieser Stelle herzlich gedankt.

## Literaturverzeichnis

- H. Hügel, T. Graf: Laser in der Fertigung: Grundlagen der Strahlquellen, Systeme, Fertigungsverfahren. 2. Aufl., Springer Vieweg, Wiesbaden, (2009), 306pp.
- [2] A. Ott: Oberflächenmodifikation von Aluminium-legierungen mit Laserstrahlung: Prozessverständnis und Schichtcharakterisierung, Dissertation, Universität Stuttgart (2010).
- [3] H. A. Macleod: Thin Film Optical Filters. 3. Auflage, CRC Press. United Kingdom (2001).
- [4] A. E. Brandes, G. B. Brook: Smithells Metals Reference Book, 7. Auflage, Butterworth Heinemann (1992).
- [5] J. R. Davis: ASM Specialty Handbook: Stainless Steels, ASM International (1994).
- [6] N. T. Aboulkhair: Additive manufacture of an aluminium alloy: processing, microstructure, and mechanical properties, Dissertation. University of Nottingham. United Kingdom (2016).
- [7] DIN EN 1706:2013-12: Aluminium und Aluminiumlegierungen - Gussstücke - Chemische Zusammensetzung und mechanische Eigenschaften; Deutsche Fassung EN 1706:2010