

LMD-Draht-Prozess mit kontrollierter Prozessführung **LMD-wire application with adjusted process control**

Dr. Frank Silze, Sebastian Bibrack, Dr. Michael Schnick
OSCAR PLT GmbH

Kurzfassung

Der LMD-Prozess mit Draht gewinnt aufgrund seiner prozessspezifischen Vorteile zunehmend Anwendung in der Industrie. Gegenüber dem schon stärker etablierten Pulverprozess wird beim Drahtprozess jedoch eine umfassendere Prozessregelung benötigt. Ursache dafür ist der Draht selbst. Dieser muss immer zu 100% aufgeschmolzen werden und auch dauerhaft Kontakt zum Bauteil haben. Es ergibt sich ein kleines Prozessfenster, welches durch Steuer- und Regelmechanismen stabil gehalten werden muss.

Das Ziel ist dabei, ähnlich zum autonomen Fahren im Straßenverkehr den Bediener zunehmend zum Passagier werden zu lassen. Ideen und Lösungen auf dem Weg dahin, wie die Regelung des Arbeitsabstandes, die Überwachung des Bauteilkontakts oder die gezielte Steuerung des Wärmeeintrags, werden vorgestellt und diskutiert.

1 Langfassung

Das Laserauftragschweißen ist schon seit einigen Jahren in der Anwendung, insbesondere der Laserprozess mit dem Zusatzwerkstoff Pulver, da dieses Verfahren vor allem bei Beschichtungen viele Vorteile bietet. Bezogen auf die Anlagenverkäufe im Umfeld der additiven Fertigung mit Metallen liegt dieses Verfahren immerhin auf Platz 2 hinter den weiterhin stark dominierenden Pulverbett- Prozessen [1].

Die Idee, den Laserauftragschweißprozess mit Draht umzusetzen, gibt es auch schon seit einigen Jahren. Allerdings eignet sich der Drahtprozess mehr für die Generierung komplexerer Geometrien, da im Bereich der Beschichtungen der Pulverprozess aufgrund der erreichbaren Härten mit den Pulverwerkstoffen sowie der höheren Auftragsraten besser geeignet scheint [2]. Die vermehrten Anfragen aus dem industriellen Umfeld zum Laserauftragschweißen mit Draht bestätigen auch den Trend zur Anwendung der Technologie in der Industrie. Der AMPOWER Report 2022 stufte den Laser-Drahtprozess („Wire Laser Beam ED“) erstmalig in den Bereich „Industrial use“ ein.

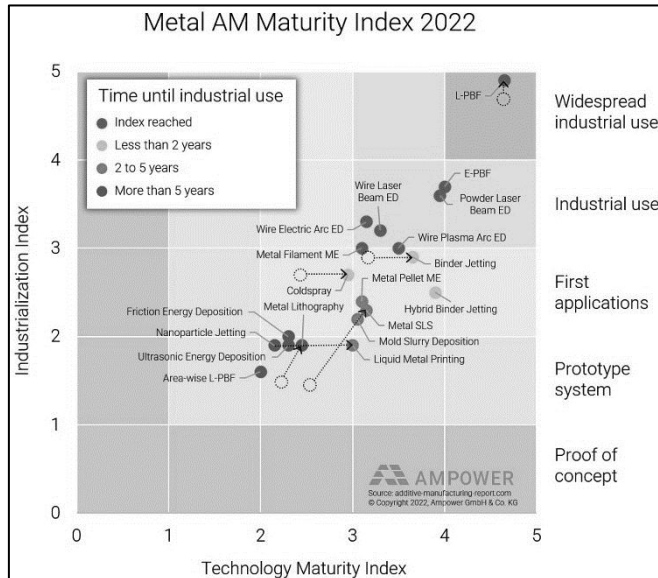


Abbildung 1: Zuordnung der metallischen AM-Prozesse entsprechend der technologischen Reife und industriellen Anwendung. [4]

Der Drahtprozess bietet im Vergleich mit dem Pulverprozess einige Vorteile: die 100%-ige Materialausnutzung führt gleichzeitig dazu, dass keine Materialreste das Bauteil und den Bauraum verunreinigen, wie es beim Pulverprozess mit einer Pulverausnutzung von maximal ca. 90% auftritt; es liegt aufgrund der etablierten Lichtbogentechnologie bereits eine große Vielfalt an Werkstoffen in Drahtform vor, was sich in Preis und Qualität widerspiegelt; viele Drahtwerkstoffe sind entsprechend geforderter Qualifizierungen beziehbar [3]. Hinzu kommen die einfachere Lagerung und Handhabung der Drahtwerkstoffe im Vergleich mit Pulvern. Vor allem bei unsachgemäßer Lagerung der Pulverwerkstoffe kann die Anreicherung mit Feuchtigkeit zu Prozessproblemen hinsichtlich hoher Porosität führen [5]. Das Risiko der Porenbildung ist beim Drahtprozess hingegen deutlich geringer. Um die Richtungsunabhängigkeit des Drahtprozesses zu gewährleisten, ist eine zentrische Materialzufuhr erforderlich. Daraus ergibt sich eine Anordnung, in der der Draht mittig zugeführt wird und die Laserstrahlung möglichst homogen um den Draht herum die Energie zum Aufschmelzen einbringt (siehe Abbildung 2). Zur konstruktiven Umsetzung dieser Anordnung gibt es verschiedene Lösungen [6-8].



Abbildung 2: Schematische Darstellung der zentrischen Drahtzuführung.

Prozessbeobachtung

Um die Qualität und die Stabilität des Schweißprozesses einschätzen und kontrollieren zu können, ist eine dauerhafte Prozessbeobachtung notwendig. Da beim Schweißvorgang ein starker Helligkeitsunterschied zwischen Schmelze und Umgebung vorliegt, sind herkömmliche Prozesskameras, auch mit Befilterungen, oft nicht ausreichend, um dem Bediener ein aussagekräftiges Bild des gesamten Prozessbereichs auszugeben. Hier erscheint es sinnvoll, Kameratechnik mit HDR-Technik (high dynamic range) einzusetzen, bei der eine Überbelichtung des Kamerasensors ausgeschlossen ist und so gleichzeitig helle als auch dunkle Bereiche gut dargestellt werden [9]. Die Unterschiede der Kameratechnik sind der Abbildung 3 zu entnehmen.



Abbildung 3: Seitliche Prozessbeobachtung; links – einfache Sensorik, befiltert, rechts – HDR-Sensorik

Basierend auf der aussagekräftigen Prozessbeobachtung kann die Prozessstabilität sowohl qualitativ als auch quantitativ dokumentiert und bewertet werden.

Kontakt zum Bauteil

Eine Herausforderung stellt beim Drahtprozess jedoch die stabile Prozessführung dar. Aufgrund der vollständigen Ausnutzung des Zusatzwerkstoffs ist hier umso mehr eine exakte Abstimmung der Prozessparameter hinsichtlich Werkstoffzufuhr und Energieeintrag notwendig.

Hinzu kommen die Prozessführung an den Start- und Endpunkten der Schweißbahnen sowie die Überwachung des Kontakts zwischen Draht bzw. der Drahtschmelze und Bauteiloberfläche während des gesamten Schweißprozesses.

Besonders der Startprozess ist beim Aufschweißen von Draht etwas komplexer als beim Aufschweißen von Pulver. Während beim Pulverprozess das Pulver am Startpunkt bereits konstant gefördert wird und nur noch der Laser zugeschaltet werden muss, ist beim Drahtprozess zunächst der Kontakt zwischen Draht und Werkstück herzustellen, bevor der Laser eingeschaltet wird. Erst dann kann die Führungsmaschine beschleunigen und die Bahnpunkte abfahren. Um diese Wartezeiten an den Startpunkten zu reduzieren, kann auch „fliegend“ gestartet werden, sodass der Draht in der Bewegung gefördert wird und der Laser zeitabhängig zuschaltet. Allerdings kann es dadurch zu Schwankungen in der tatsächlichen Startposition der Schweißbahn kommen.

Verliert der Draht während des Schweißvorgangs den Kontakt zum Bauteil, kommt es zur Bildung einer Schmelze-Kugel am Drahtende, welche durch den anhaltenden Energieeintrag des Lasers immer größer wird und den Draht hochwandert. Der Prozessabbruch ist die Folge (siehe Abbildung 4).

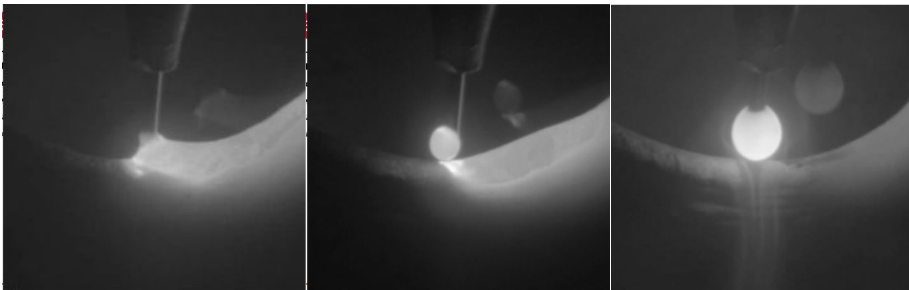


Abbildung 4: Kontaktverlust und Schmelzkugelbildung beim Drahtprozess.

Um die Bildung der Schmelze- Kugeln und den Prozessabbruch zu vermeiden, wird der Kontakt der Schmelze mit dem Grundwerkstoff dauerhaft überwacht. Sollte ein Kontaktverlust auftreten, wird innerhalb weniger Millisekunden die Laserstrahlung abgeschaltet, sodass das Anwachsen einer Schmelze- Kugel unterbunden wird. Trifft der weiterhin geförderte Draht wieder auf die Werkstückoberfläche, erfolgt die Zuschaltung der Laserstrahlung, sodass der Schweißprozess weitergeführt werden kann. Da es bei größeren Abständen ohne Kontakt zum Bauteil zu Lücken im Materialauftrag kommt, ist diese Regelung nur bis zu einem gewissen Maß sinnvoll.

Die Ursachen für den Kontaktverlust der Drahtschmelze können vielfältig sein. Ist der Drahtvorschub zu langsam eingestellt, wird der Kontakt zum Bauteil relativ schnell verloren gehen. Ist in der Bahnplanung ein etwas zu großer Lagenabstand angenommen wurden, wird sich der Fehler über mehrere Lagen hinweg aufsummieren, bis der Abstand zwischen Prozesskopf und Bauteil (Arbeitsabstand) zu groß ist und es auch hier zum Abriss kommt. Außerdem können auch vorangegangene lokale Unregelmäßigkeiten beim Materialauftrag zu zeitlich begrenzten Schwankungen im Arbeitsabstand führen.

Arbeitsabstand

Während ein Teil der Ursachen durch korrekte Einstellung der Prozessparameter zu beheben ist, können nicht alle Ursachen für Abweichung des Arbeitsabstandes vermieden werden. Insbesondere meist dann nicht, wenn bei einem realen Bauteil mit individueller Geometrie Vorversuche nur bedingt alle Prozesszustände abbilden können. Folglich ist es aus Anwendersicht hilfreich, den Arbeitsabstand zu überwachen und bei Abweichungen eine Korrektur vorzunehmen, wodurch die Prozessstabilität deutlich erhöht wird.

Da es grundsätzlich vorteilhaft ist, den Schweißprozess mit einer geeigneten Prozesskamera zu verfolgen, ergibt sich ein Lösungsweg zur Regelung des Arbeitsabstandes über die optische Vermessung der Schweißposition aus dem Kamerabild heraus. Daraus abgeleitet ergeben sich Korrekturwerte, welche an die Führungsmaschine übertragen werden können, sodass die Position des Prozesskopfes in z-Richtung verschoben wird. Dass diese Regelung den Drahtprozess deutlich stabilisiert, soll die Abbildung 5 veranschaulichen. Gerade bei dünnwandigen Strukturen können kleine Fehler zu Schwankungen im Arbeitsabstand führen bis hin zum Kontaktverlust. Dieser Defekt kann dann weiter anwachsen und das Bauteil unbrauchbar machen (Bild links). Werden die minimalen Abweichungen rechtzeitig detektiert und der Arbeitsabstand korrigiert, kann der Prozess stabil weiterlaufen und das Bauteil fehlerfrei fertiggestellt werden (Bild rechts).

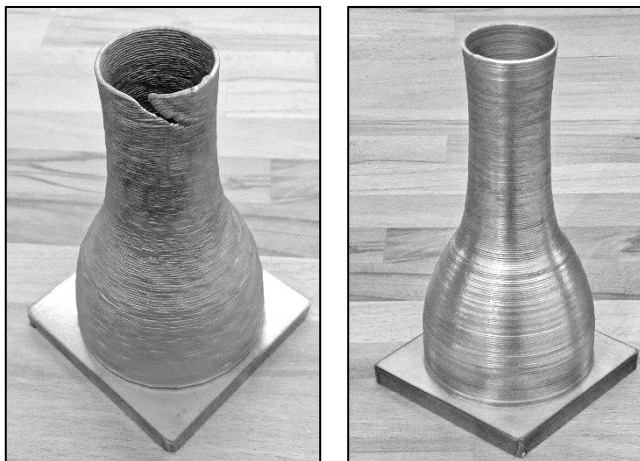


Abbildung 5: Einfluss der Regelung des Arbeitsabstandes, links – ohne Regelung; rechts – mit Regelung.

Temperaturüberwachung

Neben der Kontrolle und Regelung des stabilen Drahtabschmelzens ist für die Qualität des Bauteils ebenso die Überwachung der Temperaturentwicklung wichtig, da diese einen großen Einfluss auf die Gefügebildung und folglich auf die mechanischen Eigenschaften des Bauteils hat. Eine exakte Temperaturbestimmung ist beim Einsatz von Infrarotkameras aufgrund der Abhängigkeit von den unterschiedlichen Emissionsgraden der metallischen

Oberfläche (blank, oxidiert, geschmolzen) nicht möglich. Dennoch reichen die Ergebnisse aus, um lokale Hotspots zu identifizieren (siehe Abbildung 6) oder auch einen Grenztemperaturbereich festzulegen, ab dem im Schweißprozess eine länger Abkühlzeit vorzusehen ist. Diese Abläufe können die Prozesssteuerung integriert werden, sodass die Abkühlpausen automatisch eingefügt werden, wenn das Bauteil zu warm wird.

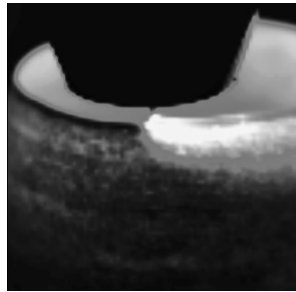


Abbildung 6: Temperaturüberwachung im Prozess mit einer Infrarot- Kamera.

Adaption des Energieeintrags

Ein Vorteil des Laserschweißprozesses liegt im niedrigen und lokal begrenzten Energieeintrag, was die Anbindung auf schwer schweißbaren Werkstoffen begünstigt und die Erwärmung des Gesamtbauteils verlangsamt. Der Energieeintrag muss trotzdem hoch genug sein, um den zugeführten Drahtwerkstoff vollständig aufzuschmelzen. Das von der OSCAR PLT GmbH genutzte Lasersystem hat eine zentrische Drahtzufuhr, welche von 6 einzeln ansteuerbaren Laserspots umgeben ist. Daraus ergibt sich die Möglichkeit, die 6 Teilbereiche des ring-ähnlichen Energieeintrags zu variieren und intelligent zu steuern, sodass der Wärmeeintrag nur in den Bereichen erfolgt, wo er benötigt wird (siehe Abbildung 7). Die Laserspots, die dem Prozess immer hinterherlaufen und auf das bereits geschmolzene Material gerichtet sind, könnten beispielsweise deutlich in der Leistung reduziert werden (Abbildung 7, Form 3).

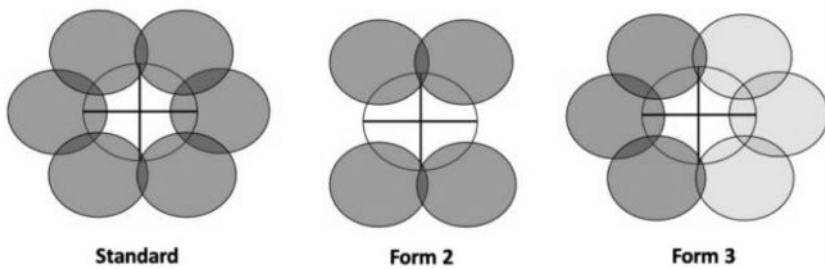


Abbildung 7: Schematische Darstellung der ring-ähnlichen Anordnung 6 einzeln ansteuerbarer Laserspots. Die Variation der Spotansteuerung ermöglicht individuelle Energie-Einträge (beispielsweise Form 2 und 3).

In Abhängigkeit der aktuellen Bewegungsrichtung des Prozesskopfes können die Lasermodule entsprechend angesteuert werden, sodass ähnlich dem Kurvenlicht am Auto die Laserenergie und somit der Wärmeeintrag präzise auf den gerade

benötigten Teilbereich eingestellt werden kann. Abbildung 8 zeigt den unteren Teil des Prozesskopfs schematisch im Querschnitt. Die sechs Balken im oberen Bereich geben die aktuelle Laserleistung des jeweiligen Moduls wieder. Beim Abfahren einer Kreisstruktur ändern sich die Einstellungen entsprechend der Richtung.

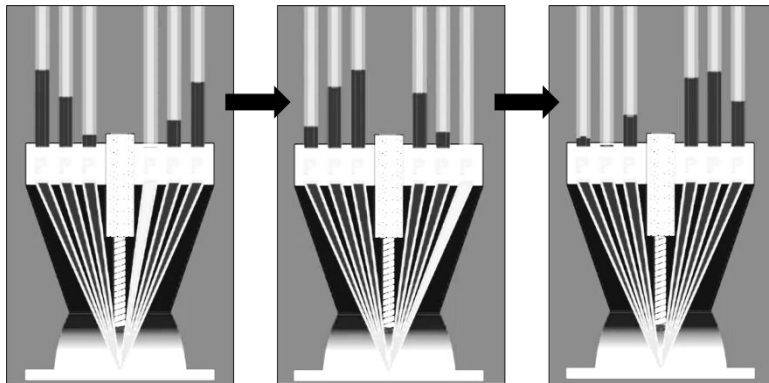


Abbildung 8: Schematischer Querschnitt des Prozesskopfes. Von links nach rechts Änderung der Leistungen der einzelnen Lasermodule.

Fazit

Der LMD- Draht-Prozess bietet eine Vielzahl an Vorteilen und Alleinstellungsmerkmalen, die den zunehmenden Einsatz im industriellen Umfeld ermöglichen. Dem erhöhten Aufwand an Prozessregelung kann mit intelligenten Lösungen begegnet werden, sodass bisher schwierige Auftragschweiß- Fragestellungen umgesetzt werden können und neue Fertigungsoptionen entstehen.

Quellen:

- [1] AMPOWER Report 2021, AMPOWER GmbH & Co. KG
- [2] Schopphoven, T. et al.: EHLA: Extreme High-Speed Laser Material Deposition, Laser Tech J 4, WILEY-VCH (2017)
- [3] www.schweissfachhandel24.de, Zugriff: 24.03.22; 11:00 Uhr
- [4] AMPOWER Report 2022, AMPOWER GmbH & Co. KG
- [5] Zhong, C. et al.: Experimental study of porosity reduction in high deposition-rate Laser Material Deposition, Opt & Las Tech Vol 75 (2015), S. 87-92
- [6] oscar-plt.de/produkte/profocus1000/, Zugriff: 24.03.22; 11:00 Uhr
- [7] www.precitec.com/de/laserschweissen/produkte/bearbeitungskoeepfe/coax-printer/, Zugriff: 24.03.22; 11:00 Uhr
- [8] www.iws.fraunhofer.de/content/dam/iws/de/documents/publikationen/infoblaetter/700-2_COAXwire_de.pdf, Zugriff: 24.03.22; 11:00 Uhr
- [9] www.centeye.com/technology/47-2/, Zugriff: 24.03.22; 11:00 Uhr