

Gemeinsamer Ergebnisbericht zum KMU-innovativ-Verbundprojekt

HoDopp:
Hochleistungsauftragschweißen mit Doppeldrahttechnik bei
nicht übertragenem Lichtbogen und Laser gestützter
Einbrandsteuerung

Förderkennzeichen: 02PK2262 - 02PK2265

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung
2. Problemstellung
3. Ziele und Ergebnisse des Verbundprojektes
4. Vorgehensweise und Projektverlauf
 - AP 1: Spezifikationen und detaillierte Anforderungsanalyse
 - AP 2: Entwicklung des Lichtbogenteilprozesses
 - AP 3: Entwicklung des Teilprozesses Lasererwärmen
 - AP 4: Prozessverknüpfung der Teilprozesse
 - AP 5: Konstruktion und Bau eines Bearbeitungskopfes
 - AP 6: Qualitätssicherung
 - AP 7: Systemintegration und industrielle Validierung
5. Fazit
6. Zusammenarbeit zwischen den Projektpartnern
7. Danksagung
8. Veröffentlichungen im Rahmen der Projektlaufzeit

1. Einleitung

Beim Auftragschweißen werden Schutzschichten gegen Verschleiß und Korrosion auf Metalloberflächen aufgebracht. Dieses Verfahren findet in der Industrie ein breites Anwendungsfeld, es reicht von Reparaturschweißungen von Turbinenschaufeln über Gesenke für die Automobilindustrie bis hin zum Panzern von Pflugscharen für die Landwirtschaft. Im Fall von großflächigen Schutzschichten, wie in Abbildung 1 dargestellt, kann dieser Vorgang über 24 Stunden dauern und erzeugt somit hohe Energie- und Personalkosten. Zusätzlich entspricht die Qualität der ersten Schichten nicht den Anforderungen der Endanwender (z.B. *bezüglich Korrosionsbeständigkeit und Härte*), sodass weitere Schichten aufgebracht werden müssen, bis sich die gewünschte Qualität einstellt. Bei dem bisher eingesetzten Standard MAG-Verfahren brennt ein Lichtbogen zwischen der Drahtelektrode und dem Werkstück und schmilzt beides gleichzeitig auf. Dieses Vorgehen bringt sehr viel Wärme in das Werkstück ein, führt damit zu Bauteilverzug und schränkt die Produktivität ein.

Im Projekt HoDopp wurden diese Einschränkungen durch Trennung der beiden Aufschmelzprozesse aufgehoben. Der Lichtbogen brennt nicht zwischen Draht und Werkstück, sondern zwischen zwei Drähten, wie in Abbildung 2 dargestellt. Dadurch kann bei gleicher Lichtbogenenergie eine wesentlich größere Menge Zusatzmaterial dem Auftragprozess zur Verfügung gestellt werden. Das Aufschmelzen der Bauteiloberfläche zur Gewährleistung einer stoffschlüssigen Anbindung wird mit einem Laserprozess durchgeführt. Mit einer Ablenkeinheit wird die Laserenergie gesteuert in das Bauteil eingebracht. Damit werden ein gleichmäßiges Verschweißen der Schutzschicht und ein geringer Aufmischungsgrad von Substrat- und Schichtmaterial realisiert. Die Entkopplung der Schmelzprozesse führt weiterhin dazu, dass der Lichtbogenprozess das Bauteil thermisch nur wenig belastet. Daraus folgt, dass mit wesentlich größeren Energien gearbeitet werden kann, wodurch die Abschmelzleistung und damit die Auftragrate gesteigert werden kann.

Die Produktivitätssteigerung des neuen Verfahrens setzt sich damit aus zwei Komponenten zusammen: Einer Verbesserung der Schichtqualität, die gewährleistet, dass bereits nach einer Schicht die gewünschten Eigenschaften erzielt werden und einer Erhöhung der Auftragrate, wodurch mehr Fläche pro Zeit beschichtet werden kann.

2. Problemstellung

Die Firmen Druckguss Service Deutschland GmbH und die G + F Strate GmbH Schweißwerk-Maschinenfabrik verwenden ein MSG-Auftragschweißverfahren, wie es auch von der Firma MERKLE angeboten wird zum Beschichten und für die Reparatur von Bauteilen. Die zu bearbeitenden Flächen bei Wellen oder Werkzeugen können dabei mehrere Quadratmeter betragen (Abbildung 1).

Bei den gegenwärtig erzielten Auftragraten von maximal 5 kg/h werden ca. 24 h für das Beschichten eines Quadratmeters benötigt. Hinzu kommt, dass aufgrund der hohen Einschweißtiefe von rund 3,5 mm, wie sie beim Standard MAG-Verfahren auftritt, ein hoher Materialaufmischungsgrad von bis zu 30 % zustande kommt. Daraus resultiert eine Verminderung der Reinheit der ersten aufgetragenen Schicht und damit auch der potentiell erzielbaren Qualität der Schutzeigenschaften. Um diese Nachteile zu kompensieren, werden weitere Schichten aufgebracht, bis sich die gewünschte Qualität einstellt. Auf diese Weise muss der Beschichtungsprozess bis zu dreimal wiederholt werden, was die Bearbeitungszeit entsprechend verlängert und zu hohen Prozess- und Materialkosten führt.

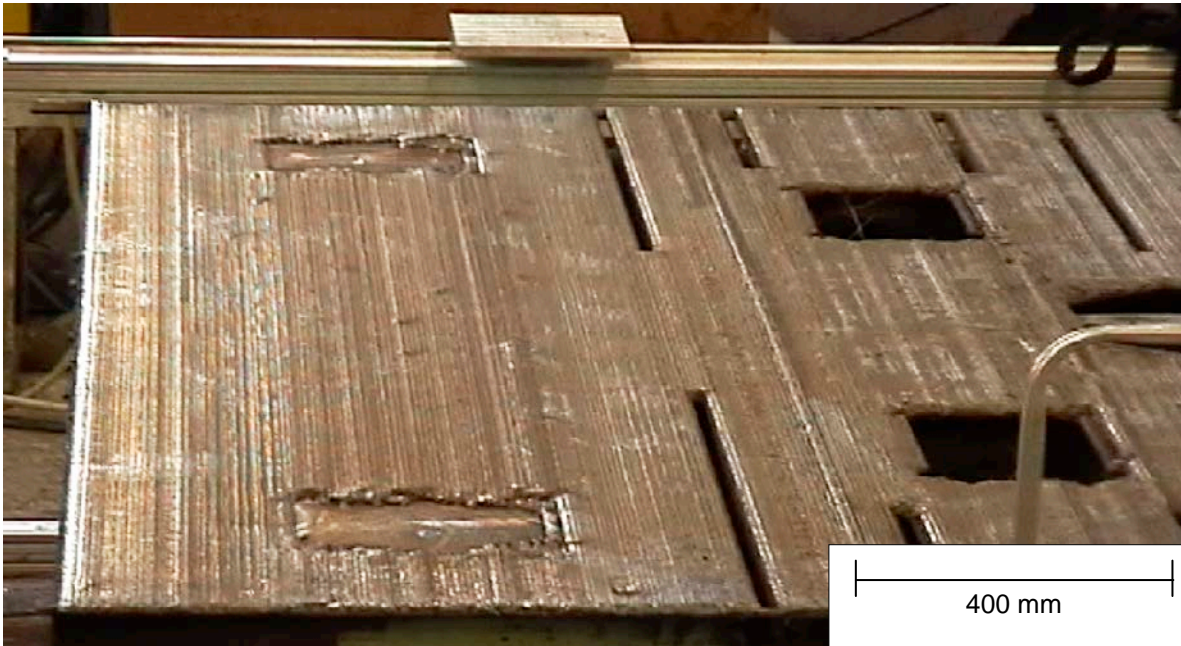


Abbildung 1: Bauteil mit großflächiger Beschichtung (2,0 x 1,8 m)

3. Ziele und Ergebnisse des Verbundprojektes

Ziel des Projekts HoDopp war es, die Auftragsrate zu erhöhen und gleichzeitig den Aufmischungsgrad um 80 % zu reduzieren. Dies wird durch die Kombination der Vorteile aus zwei Prozessen erreicht. Zum einen soll ein Lichtbogenprozess für hohe, aber günstige Auftragsraten sorgen. Der Laserprozess soll Präzision und geringe Einschweißstiefen garantieren. Die Funktionsweise ist in Abbildung 2 dargestellt.

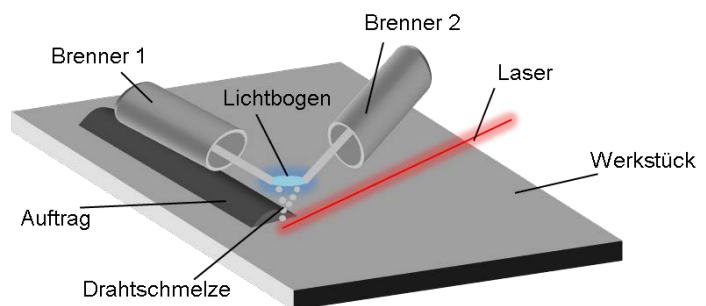


Abbildung 2: Prinzipskizze der Verfahrenskombination

Die Prozesskombination enthält dabei mehrere Innovationen: Als Lichtbogenprozess wird ein nicht übertragener Lichtbogen eingesetzt. Dieser brennt zwischen zwei Drahtelektroden und schmilzt diese gleichzeitig ab, ohne den Lichtbogen auf das Werkstück zu übertragen. Dies führt zu zwei Vorteilen: Zum einen wird die Lichtbogenenergie hocheffizient zum Aufschmelzen der Drähte genutzt. Zum anderen führt die beschriebene Prozessführung zu einer Entkopplung vom Aufschmelzen des Drahtwerkstoffes und der Bauteiloberfläche. Durch diese Entkopplung kann der Einbrand und damit der Aufmischungsgrad gezielt durch den Laserprozess eingestellt werden. Dabei wird Laserstrahlung geringer Leistung (≤ 1 kW) genutzt, welche kurz vor dem Auftreffpunkt der Schmelze auf das Bauteil fokussiert wird und dafür sorgt, dass die Oberflächentemperatur derart eingestellt ist, dass lediglich die Werkstückoberfläche angeschmolzen wird.

Um die Temperaturverteilung quer zur Naht zu beeinflussen, kommt eine Ablenkeinheit zum Einsatz, mit der die Laserstrahlung auf dem Bauteil gesteuert werden kann. Durch eine präzise Einstellung wird ein gleichermaßen geringer wie homogener Einbrand erzeugt, was zu sehr kleinen Aufmischungsgraden führt. Die hierfür verwendbaren Strahlungsquellen sind

mit den Diodenlasern neuester Generation günstig kommerziell verfügbar. Sowohl ihre Anschaffung als auch ihr Betrieb liegen im finanziellen Rahmen kleiner und mittelständischer Unternehmen.

Übergeordnetes Ziel des Projektes war die Reduzierung der Bearbeitungszeit, was ein wirtschaftliches Arbeiten, trotz hoher Lohnkosten in Deutschland, aufgrund von Technologievorsprung ermöglicht. Nach dem erfolgreichen Umsetzen des Projektes ergeben sich somit folgende Ergebnisse: Senkung der Prozesszeiten, Verbesserung der Schichtqualität durch Verringerung des Aufmischungsgrads um ca. 80 % auf weniger als 5 %, Steigerung der Produktivität durch Erhöhung der Prozessgeschwindigkeit. Reduzierung des Bedarfs an teurem Beschichtungsmaterial durch eine geringe Aufmischung und der damit verbundenen Steigerung der Schutzeigenschaften bereits in der ersten Schicht.

4. Vorgehensweise und Projektverlauf

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden 7 Arbeitspakete gebildet und auf die Projektpartner hinsichtlich ihrer Kernkompetenzen aufgeteilt:

AP 1: Spezifikationen und detaillierte Anforderungsanalyse

AP 2: Entwicklung des Lichtbogenprozess

AP 3: Entwicklung des Teilprozesses Lasererwärmen

AP 4: Prozessverknüpfung der Teilprozesse

AP 5: Konstruktion und Bau eines Bearbeitungskopfes

AP 6: Qualitätssicherung

AP 7: Systemintegration und industrielle Validierung

AP 1: Spezifikationen und detaillierte Anforderungsanalyse

Gegenstand von AP1 war eine detaillierte Anforderungsanalyse. Das Ergebnis waren Richtwerte für Zielgrößen wie Auftragsleistung und Aufmischungsgrad sowie die zu behandelnden Werkstoffkombinationen. Es wurden die erforderlichen Spezifikationen hinsichtlich des aufzutragenden Materials, des Grundmaterials, der Einbrandtiefe (Einschweißtiefe) sowie der Qualität des Auftrages (Auftragsbreite, Höhe, „Welligkeit“ zwischen den Lagen) definiert. Grundlage der Spezifikationen waren Analysen der mit den gängigen Verfahren aufgetragenen Schichten (z.B. Härte, Korrosionsverhalten), Ergebnisse im Austausch mit den Projektpartnern sowie Literaturrecherchen.

Des Weiteren galt es, geeignete Demonstratoren (in repräsentativer Größe und Güte) auszuwählen und bereit zu stellen. Aufgrund der Größe und des Gewichtes der Demonstratoren kamen für die ersten Versuche Bleche mit einer Dicke von 20 mm zum Einsatz.

AP 2: Lichtbogenprozess

Im Arbeitspaket 2 wurde vom Projektpartner Merkle Schweißanlagen-Technik eine Schweißanlage Typ HighPULSE 550 (Abbildung 3) mit Doppeldrahtfördereinheit DV-31 (Abbildung 4) modifiziert und in Betrieb genommen. Im Gegensatz zu einer Standardmaschine verfügt die Anlage über ein Drahtvorschubgerät mit 2 Antrieben. Ein Schweißdraht ist positiv, der andere negativ gepolt. Zwei Motorregler sind vorhanden, so dass die beiden Drähte mit

unterschiedlichen Geschwindigkeiten gefördert werden können. Die Energieeinstellung erfolgt über einen Knopf, die Korrektur der Drahtgeschwindigkeiten ist getrennt für beide Antriebe.



Abbildung 3: HighPULSE 550 DW



Abbildung 4: Doppeldrahtvorschubkoffer

Folgend wurden einige Parameter im Lichtbogenprozess festgesetzt, dazu zählt unter anderem auch die Stellung der Brenner zueinander.

Es zeigte sich bereits in den Vorversuchen, dass die Stellung des positiv bzw. negativ gepolten Brenners sowohl einen grundlegenden Einfluss auf die Qualität des Auftrages als auch auf die Stabilität des Prozesses hat.

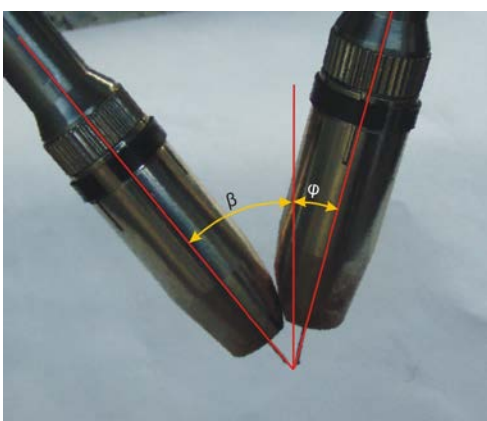


Abbildung 5: Brennerstellung

Auch die Vorschubgeschwindigkeit der einzelnen Drähte zeigte großen Einfluss auf den Prozess.

Es wurde bereits zu Projektbeginn eine Drahtvorschubgeschwindigkeit von 35,6 m/min (addiert) erreicht, was ca. 20 kg/h entspricht.

Jedoch wurde bei diesen sehr hohen Abschmelzleistungen keine zufriedenstellende Anbindung erzielt.

Als Projektschwerpunkte kristallisierte sich die Ermittlung der Prozessparameter heraus, um maximale Auftragsraten mit Übereinstimmung der in AP1 definierten Qualität zu erreichen.

Der Lichtbogenprozess wurde mit Hilfe verschiedener Methoden untersucht. Hierzu zählten unter anderem die Untersuchung des Lichtbogens mit Hochgeschwindigkeitskameras als auch mit Thermographiekameras (Abbildungen 6 und 7).

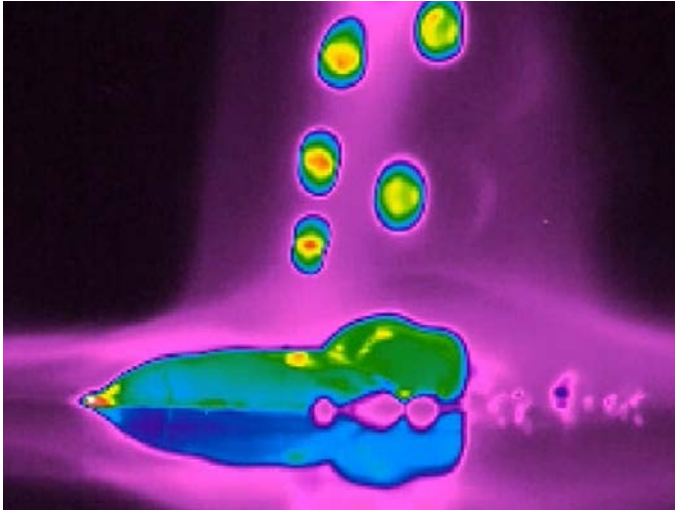


Abbildung 6: Thermographische Untersuchung



Abbildung 7: Hochgeschwindigkeitsuntersuchung

AP 3 Entwicklung des Teilprozesses Lasererwärmen

Die Möglichkeit, eine geringe und homogene Einschweißtiefe zu erzeugen, hängt im Wesentlichen davon ab, eine Energiequelle zur Verfügung zu haben, welche gut dosierbar und örtlich steuerbar Wärme in das Bauteil einbringen kann. Diese Eigenschaften bietet der Laser. Um die Laserstrahlung auf dem Bauteil wie gewünscht einzubringen, musste eine entsprechende Systemtechnik aufgebaut werden (Abbildung 8 und 9). Dabei handelt es sich um eine Ablenkeinheit, welche die Strahlung quer zum Nahtverlauf pendeln kann. Je nach Art des Pendelns kann so die Wärmeverteilung direkt vor dem Auftreffen der Schmelze derart eingestellt werden, dass ein gleichmäßiges Verschweißen der Schutzschicht ohne übermäßige Bauteilerwärmung oder Materialaufmischung ermöglicht wird.

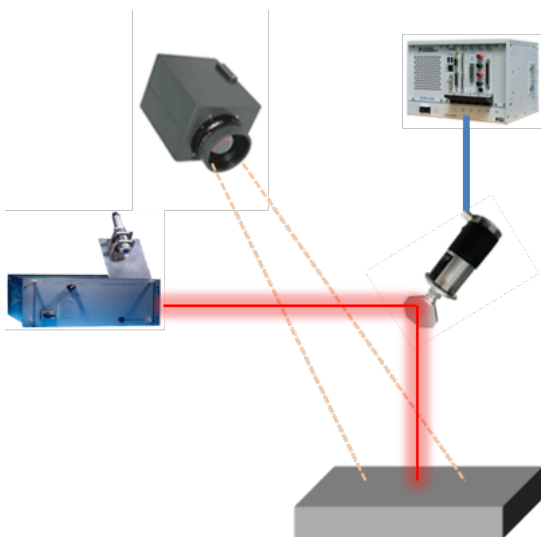


Abbildung 8: Prinzip der Versuchsanordnung

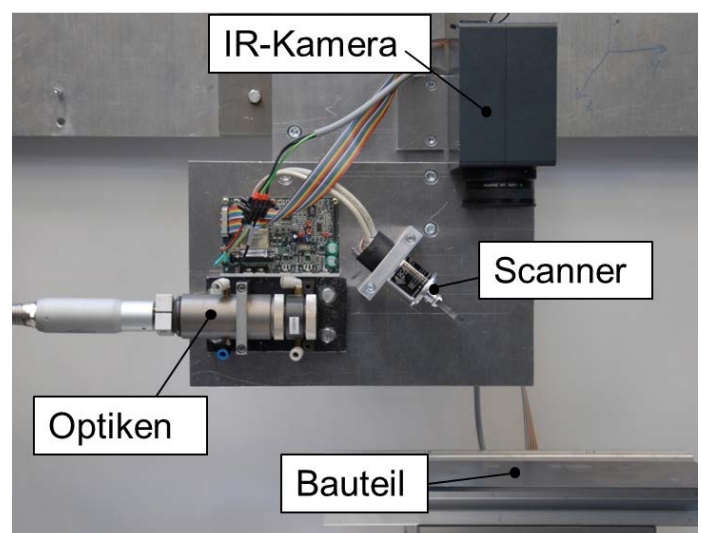


Abbildung 9: Versuchsaufbau Lasererwärmen

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes wurde die Erzeugung solcher gleichmäßigen Wärmeverteilung untersucht und quantifiziert. Die Rahmenbedingung eines möglichst geringen Einsatzes von Laserenergie war dabei ein Kernpunkt. So hängt die Absorption der Laserstrahlung beispielsweise von dem Einfallswinkel des Lasers, dem Material und der Oberflächenbe-

schaffenheit ab. Auch der Fokusbereich des Laserstrahls und die damit verbundene Intensität spielen hier eine Rolle. Nach vielen Versuchen mit einer Laserleistung von 500 W (Leistung zu gering) und einem gedrosseltem 16 kW Scheibenlaser zeigte sich im Projektverlauf, dass ein 1,5 kW Diodenlaser die ideale (hinsichtlich Leistung, Bauraum, Bedienung und Anschaffungskosten) Laserquelle für diesen Prozess ist.

Die Erkenntnisse aus diesem AP fließen in die Entwicklung des Bearbeitungskopfes ein, welcher die Lasersystemtechnik mit der Lichtbogentechnik vereint.

AP 4 Prozessverknüpfung der Teilprozesse

Nachdem beide Teilprozesse für sich entwickelt waren, begann die Prozessentwicklung bezüglich der Kombination der Teilprozesse. Im Besonderen war die Abstimmung unter Berücksichtigung eventueller gegenseitiger Beeinflussung der Teilprozesse Hauptteil des Arbeitspaketes. Ziel des APs war ein Verfahren mit hoher Auftragsrate und geringem Einbrand bereitzustellen.

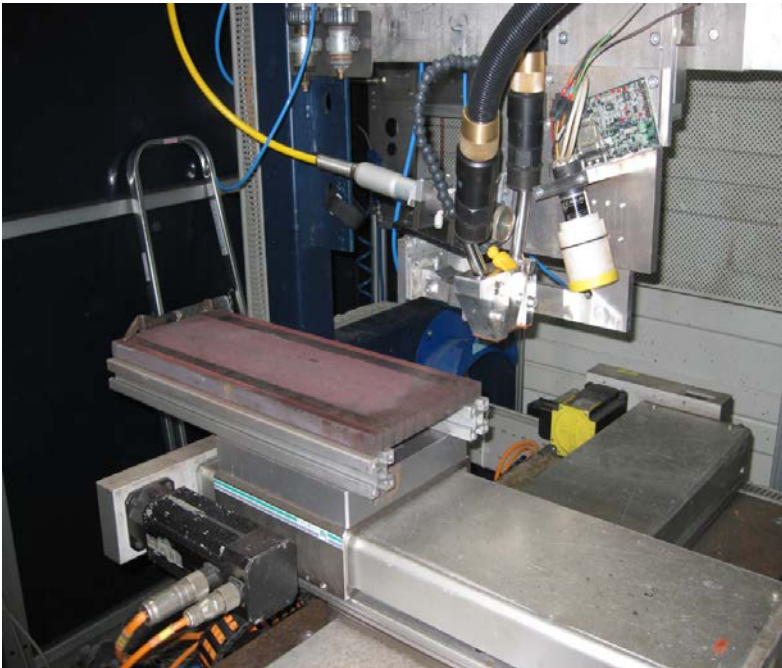


Abbildung 10: Versuchsaufbau (LZH)

Der Versuchsaufbau am Laser Zentrum Hannover bestand aus einem CNC Tisch, der die Versuchsbleche mit unterschiedlichen Vorschubgeschwindigkeiten bewegen konnte. Stationär montiert waren die Schweißbrenner, der Scannerspiegel sowie die Strahlzuführung (Abbildung 10).

Mehr als 800 Probeschweißungen wurden hier vorgenommen und durch die Partner Druckguss Service Deutschland GmbH, G+F Strate GmbH sowie durch das LZH selbst untersucht. Primärer Untersuchungsgegenstand war die Einschmelztiefe.

AP 5: Bau/Konstruktion

In Arbeitspaket 5 wurde sowohl der Bearbeitungskopf (Kombination beider Prozesse) als auch die Schweißanlagentechnik der industriellen Partner (Druckguss Service Deutschland GmbH, G + F Strate GmbH) entwickelt bzw. weiterentwickelt. Mit dem durch die Firma Merke Schweißanlagen-Technik GmbH in Zusammenarbeit mit dem LZH entwickelten Bearbeitungskopf (Abbildung 11 und 12) konnte die prinzipielle Funktionsweise der Systemtechnik demonstriert werden. Weiteren Entwicklungsbedarf gibt es beispielsweise beim Schutz der optischen Komponenten und bei der Sicherstellung der Schutzgasabdeckung.

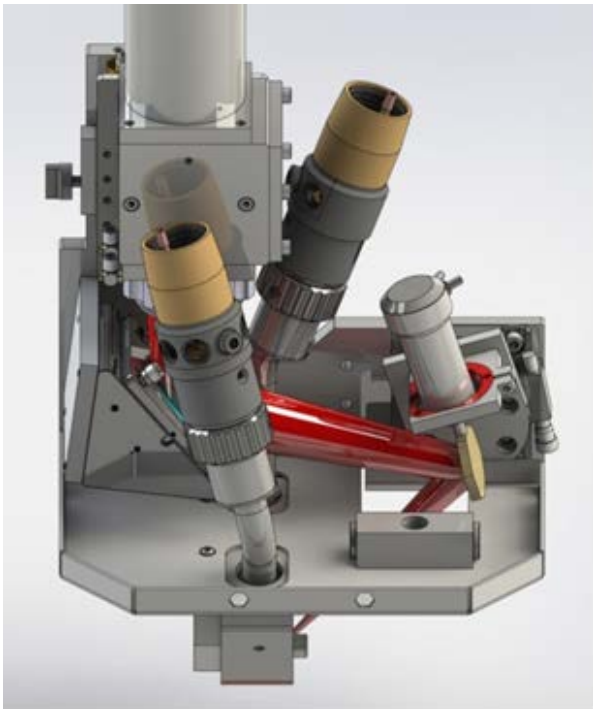


Abbildung 11: *Bearbeitungskopf CAD*



Abbildung 12: *Bearbeitungskopf Aufbau*

AP 6 Qualitätssicherung

Die Qualitätssicherung gliederte sich in zwei Teilbereiche. Im ersten stellten die Projektpartner Druckguss Service Deutschland GmbH und die G + F Strate GmbH – Schweißwerk - Maschinenfabrik während der Prozessentwicklung sicher, dass diese zielgerichtet gemäß der Anforderungsanalyse aus AP 1 durchgeführt wurde. Im zweiten Teilbereich wurden prozesskritische Parameter wie Strom-Spannungsverlauf sowie die Drahtgeschwindigkeiten aufgezeichnet. Dies diente der Dokumentation des Fertigungsprozesses zur Sicherstellung der Qualität. Außerdem wurden während der Prozessentwicklung und der industriellen Validierung metallurgische Untersuchungen durchgeführt, um die Ergebnisse bewerten zu können.

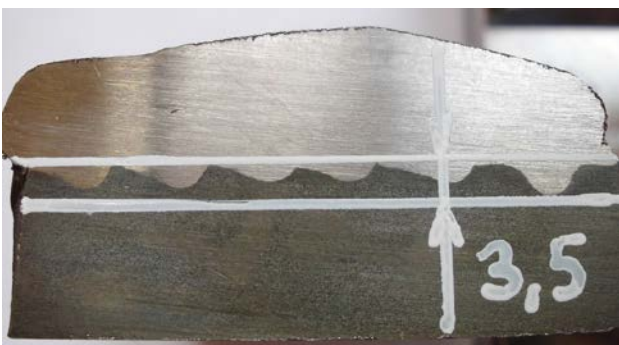


Abbildung 13: *Stand der Technik (MAG Prozess)*



Abbildung 14: *Das HoDopp-Verfahren erreicht eine geringe Einschweißtiefe*

Die Abbildung 13 zeigt den Einbrand an einer Auftragschweißung, hergestellt mit einem konventionellen MAG Prozess. Die maximale Einbrandtiefe beträgt 3,5 mm (ca. 35% Aufmischungsgrad). Abbildung 14 hingegen zeigt den Schliff einer Schweißung, welche mit dem

HoDopp-Verfahren hergestellt worden ist. Die Einbrandtiefe liegt bei nur ca. 0,1 mm (Aufmischungsgrad < 5%). Die Vorschubgeschwindigkeit betrug bei Probenerstellung ca. 600 mm/min bei einer Abschmelzleistung von ca. 7 kg/h. Diverse Versuche (u.a. auch Normzugversuche nach DIN 50125) bestätigten, dass auch dieser geringe Einbrand ausreicht, um vollständige Bindung an den Grundwerkstoff zu gewährleisten.

AP 7 Systemintegration und industrielle Validierung

Auf die Fertigstellung des Bearbeitungskopfes und der Prozessentwicklung folgte die Integration in die vorhandenen Schweißanlagen und die industrielle Validierung. Hierzu wurde die notwendige Systemtechnik zu den Partnern gebracht, die als Anwender im Projekt mitarbeiten. Dabei handelte es sich um die Schweißquelle, den Laser und den Bearbeitungskopf sowie die notwendige Peripherie.

Der Aufbau der Versuchsanlage erfolgte zu Beginn des 2. Quartals bei der Druckguss Service Deutschland GmbH in Lübeck (Abbildung 15) und im 3. Quartal in Hannover bei der Firma G + F Strate GmbH - Schweißwerk – Maschinenfabrik (Abbildung 16). Der HoDopp Bearbeitungskopf wurde an die vorhandene, umgebaute Portalanlage adaptiert. Die Schweißversuche wurden an den vorbereiteten Demonstratoren durchgeführt.

Es zeigte sich, dass der Laborprozess sich ebenso an praxisnahen Bauteilen (Aufspannplatten) umsetzen lässt. Die untersuchten Proben entsprachen hinsichtlich Qualität und Auftragsraten den Laborproben. Weiterhin konnte demonstriert werden, dass eine rudimentäre Lasersicherheit mit einfachsten Mitteln aufgebaut werden kann.



Abbildung 15: Versuchsaufbau Druckguss Service

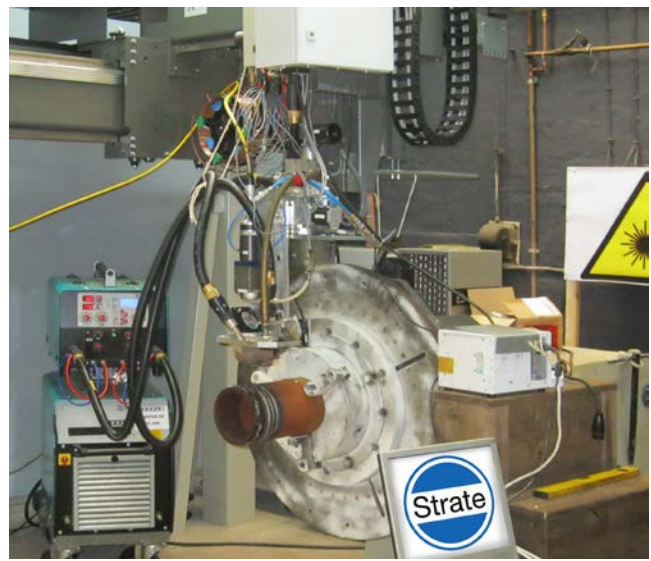


Abbildung 16: Versuchsaufbau G + F Strate

5. Fazit

In dem BMBF Projekt „HoDopp - Hochleistungsauftragschweißen mit Doppeldrahttechnik bei nicht übertragenem Lichtbogen und Laser gestützter Einbrandsteuerung“ wurde ein neuartiges Schweißverfahren zum Aufbringer großer Mengen Zusatzwerkstoff bei minimaler Aufschmelztiefe entwickelt.

Mit der Anwendung dieses Verfahrens lassen sich enorme Kosten einsparen. Vor allem können einlagige, sehr hochwertige Auftragsschichten erzeugt werden. Das Aufbringen weiterer Schichten aufgrund der hohen Aufmischung bei konventionellen Auftragsschweißverfahren (MAG, UP) entfällt.

6. Zusammenarbeit zwischen den Projektpartnern

Die Zusammenarbeit zwischen den Projektpartnern war durchweg positiv. Es fanden regelmäßige Projekttreffen statt. Diese Treffen gaben einen optimalen Überblick, ermöglichten den Austausch von praktischen Erfahrungen und waren eine Plattform, um die weiteren Schritte zu diskutieren. In ergänzenden Arbeitstreffen wurden weitere detaillierte Schritte besprochen, um eine optimale Koordination und ein reibungsloses Zusammenspiel zu gewährleisten.

Partner im BMBF-Projekt HoDopp waren:

- Merkle Schweißanlagen-Technik GmbH, Kötz (Koordinator)
- Laser Zentrum Hannover e.V.
- Druckguss Service Deutschland GmbH, Lübeck
- G+F Strate GmbH Schweißwerk-Maschinenfabrik, Hannover

7. Danksagung

Die vorgestellten Arbeiten wurden im Projekt HoDopp „Hochleistungsauftragschweißen mit Doppeldrahttechnik bei nicht übertragenem Lichtbogen und Laser gestützter Einbrandsteuerung“ durchgeführt. „Dieses Forschungs- und Entwicklungsprojekt wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) innerhalb des Rahmenkonzeptes "KMU-innovativ" unter den Förderkennzeichen 02PK2262 - 02PK2265 gefördert und vom Projektträger Forschungszentrum Karlsruhe (PTKA), Bereich Produktion und Fertigungstechnologien (PFT) betreut.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

8. Veröffentlichungen im Rahmen der Projektlaufzeit

Zimmermann, F.; Schaper, K.; Barroi, A.; Hermsdorf, J.; Wesling, V.; Prank, U.: *HoDopp: Hochleistungsauftragschweißen mit Doppeldrahttechnik bei nicht übertragenem Lichtbogen und Laser gestützter Einbrandsteuerung*: 18. Kolloquium Reparaturschweißen SLV Halle, Halle 2014

Barroi, A.; Amelia, J.; Hermsdorf, J.; Kaieler, S.; Wesling, V.: *Influence of the Laser and its Scan Width in the LDNA Surfacing Process*: Physics Procedia 56 (2014): 204-210

Barroi, A.; Hermsdorf, J.; Prank, U.; Kaieler, S.: *A Novel Approach for High Deposition Rate Cladding with Minimal Dilution with an Arc-Laser Process Combination*: Physics Procedia 41 (2013), 249-254

Barroi, A.: *Vier Partner, zwei Verfahren, ein Ziel*: phi 2013:2 und www.phi-hannover.de