Gall & Seitz Systems GmbH

26.02.2025

Schlussbericht

im Rahmen des Verbundprojekt

Flexible und effiziente Generierung von unikaten Schiffsbauteilen mittels eines innovativen laserunterstützten additiven Fertigungsprozesses (FlexiGen)

zum Teilvorhaben

Entwicklung einer Demonstratoranlage für das laserunterstützte Auftragschweißen mit nicht übertragenem Lichtbogen

Projektnummer: 03SX517A

Projektträger Jülich
Forschungszentrum Jülich GmbH
Marine und Maritime Forschung,
Geowissenschaften und Schifffahrt (MGS),
Fachbereich MGS 3/MGS 4

Projektträger Jülich
Forschungszentrum Jülich

Projektpartner:
Merkle Schweißanlagen – Technik GmbH
LZH – Laserzentrum Hannover e.V.
MEYER WERFT GmbH & Co. KG
Laserline GmbH

Gefördert durch:

Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

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

Inhaltsverzeichnis

1 Kurzdarstellung des Projektes 4
1.1 Einleitung und Motivation 4
1.2 Aufgabenstellung und Ziele dieses Teilvorhabens 5
1.3 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde 5
1.4 Planung und Ablauf des Vorhabens 6
1.5 Wissenschaftlicher und technischer Stand der Technik 7
1.5.1 Additive Fertigungsverfahren 7
1.5.2 Auftragschweißen mit dem LDNA-Verfahren 9
1.5.3 Mobiles Auftragschweißen 10
2 Eingehende Darstellung 11
2.1 Verwendung der Zuwendung im Teilprojekt 11
2.1.1 AP1 Spezifikation 11
2.1.2 AP7 Demonstratoranlage 11
2.1.2 Projektübergreifender Workshop 15
2.3 Während des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt bei anderen Stellen 15
2.4 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen 16
3 Literaturverzeichnis 18

Abkürzungsverzeichnis

AP	Arbeitspaket
AM	engl.: Additive Manufacturing
CMT	engl.: Cold Metal Transfer
DNV	Det Norske Veritas
FAT	engl.: Fatigue
Fh IGP	Fraunhofer-Institut für Großstrukturen in der Produktionstechnik
HAZ	engl.: Heat Affected Zone
HP	Hollandprofil
LDNA	Laserunterstütztes Doppeldrahtschweißen mit nicht übertragenem Lichtbogen
LNG	engl.: Liquefied Natural Gas
LZH	Laser Zentrum Hannover e.V.
MAG	Metall-Aktivgas
MS	Meilenstein
MSG	Metall-Schutzgas
OCT	Optische Kohärenztomographie
POD	Propellergondel
TAP	Teilarbeitspaket
WAAM	engl.: Wire Arc Additive Manufacturing
WEZ	Wärmeeinflusszone
WI	engl.: Work Instructions

1 Kurzdarstellung des Projektes

Im Folgenden wird zunächst kurz das Gesamtvorhaben „FLEXIGEN - Flexible und effiziente Generierung von unikaten Schiffsbauteilen mittels eines innovativen laserunterstützten additiven Fertigungsprozesses“ vorgestellt. Dabei werden neben der Motivation die Aufgabenstellung und Zielsetzungen sowie die Vorgehensweise und der Ablauf des Projektes erläutert.

1.1 Einleitung und Motivation

Übergeordnetes Ziel des Gesamtvorhabens war es, die Wettbewerbsfähigkeit des deutschen Schiffbaus im internationalen Vergleich durch die Entwicklung eines innovativen, hochtechnologischen und flexiblen Fertigungsverfahrens zur Umsetzung von Leichtbaumaßnahmen zu steigern. Der zielgerichtete und ressourceneffiziente Einsatz von Werkstoffen und Energie zur Herstellung von Leichtbaustrukturen leistet einen langfristigen Beitrag zum umweltschonenderen Schiffsbetrieb durch Reduzierung der erforderlichen Antriebsenergie. Neben der Kraftstoffersparnis und der verringerten Emissionen können Leichtbaustrukturen zur Optimierung des Gesamtschwerpunkts des Schiffes und somit zur Vergrößerung der Betriebssicherheit eingesetzt werden.
Der Einsatz additiver Verfahren kann die Möglichkeiten zur Gewichtsreduktion, die individuelle Verstärkungs- und Aussteifungsstrukturen bieten, optimal nutzen. Die gezielte Auswahl der zu verwendenden Werkstoffe hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften und die konsequente Nutzung der konstruktiven Möglichkeiten eines additiven Fertigungsverfahrens erschließen die bislang ungenutzten Potentiale im Leichtbau. Hierbei kommen eine Kombination zur Auslegung belastungsgerechter Verstärkungen mittels digitaler Produktion und deren schweißtechnische Realisierung durch individuell optimierte Wandstärken mittels additiver Verfahren zum Einsatz. Die wirtschaftliche Umsetzung der geforderten Maßgenauigkeit der notwendig komplexen Strukturen bei gleichzeitig hohem Materialauftrag leisten hochtechnologische hybride Fügeverfahren wie das Laserhybridschweißen, welche in der automatisierten Fertigung im Schiffbau derzeit keine Anwendung finden.
Konkretes Ziel des Gesamtvorhabens war daher die Entwicklung eines effizienten hybriden Fertigungsverfahrens, welches den bauteiltechnischen Anforderungen wie z.B. Geometriefreiheit, Maßhaltigkeit und Wärmeeintrag, sowie den verfahrenstechnischen Vorgaben hinsichtlich Aufbaurate gerecht wird. So wurde beispielsweise eine Auftragrate von weit über 10 kg/h angestrebt. Die herzustellenden Strukturen können aus der Geometrie und den planmäßigen Belastungen der Schiffsbauteile vorab berechnet und mit der im Vorhaben zu errichtenden Demonstrationsanlagen automatisch gefertigt werden. Das Vorhaben erschließt so die Potentiale der schiffbaulichen Konstruktion im Leichtbau, ohne bestehende allgemeingültige Regeln des Schiffsbaus anpassen zu müssen. Eine zukünftige Umsetzung der entwickelten Leichtbaukonzepte durch Einsatz dünnwandiger Strukturen kann daher in Übereinstimmung mit den aktuellen nationalen als auch internationalen Regularien des Schiffbaus erfolgen.

Mit dieser Zielstellung trägt das Vorhaben wesentlich zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit deutscher maritimer Unternehmen und zur Wahrung und Ausweitung ihrer internationalen Technologieführerschaft mittels eines hocheffizienten Produktionsverfahrens zur Herstellung unikater Schiffbauteile bei.

1.2 Aufgabenstellung und Ziele dieses Teilvorhabens

Das übergeordnete Ziel des Gesamtvorhabens war die Bereitstellung eines innovativen hybriden laser- und lichtbogengestützten additiven Fertigungsprozesses und die Entwicklung von Anwendungsrichtlinien für diesen, sowie dessen Eigenschaften im Rahmen einer Demonstratoranlage zur Fertigung von unikaten Schiffsbauteilen in einem werftnahen Umfeld nachzuweisen. Für eine bestmögliche Entwicklung der dazu notwendigen, individuellen Einzeltechnologien wurde das Gesamtvorhaben in 5 Teilprojekte unterteilt, die in enger Abstimmung mit dem Konsortium bearbeitet wurden.

Der Nachweis der industrienahen Einsetzbarkeit soll anhand der Fertigung anwendungstypischer Demonstratorbauteile mit einer mobilen Demonstratoranlage erfolgen. Gall & Seitz Systems hat hierfür ein entsprechendes Integrationskonzept der vielfältigen Anlagenkomponenten Roboter, Drahtförderer, Schweißstromquelle, Laserstrahlquelle und -führung entwickelt und federführend umsetzen. Dieses beinhaltete neben der Definition von mechanischen und elektrischen Schnittstellen auch die Entwicklung eines geeigneten Steuerungskonzepts sowie die Bereitstellung von Betriebsanweisungen und Bedienanleitungen für den Einsatz der Anlage.

1.3 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Der geschäftliche Fokus von Gall & Seitz Systems GmbH liegt in den historisch gewachsenen Geschäftsfeldern Schiffsreparatur und Rohrproduktion. Seit 2011 ist Gall & Seitz Systems auch im Bereich Laseranlagenbau aktiv. Gall & Seitz Systems betreibt am Standort Hamburg drei stationäre Anlagen zum Laser-Pulver-Auftragschweißen. In den letzten Jahren wurden eigene mobile Anlagen zum Laser-Pulver-Auftragschweißen entwickelt und erfolgreich in den Markt eingeführt. Derzeit betreibt Gall & Seitz Systems zwei mobile Anlagen zum Laser-Pulver-Auftragschweißen und betreut fünf mobile und fünf stationäre Systeme bei Joint Venture Partnern und Drittkunden. Neben der Anlagentechnik werden von Gall & Seitz Systems sowohl Software und zertifizierte Schweißprogramme, als auch die Schulung der Techniker und die komplette technische Betreuung bereitgestellt. Somit ist Gall & Seitz Systems einer der größten kommerziellen Anbieter zum Laser-Pulver-Auftragschweißen im Bereich der Reparatur hochwertiger Maschinenkomponenten aus dem Schiffs- und Maschinenbau. Die 32 beschäftigten Ingenieure, Maschinenschlosser, Schweißer, Rohrschlosser und Dreher werden ständig weitergebildet und gehören zum festen Personal.

1.4 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Projekt wurde beantragt und mit einer Laufzeit von 36 Monaten bewilligt. Im Laufe des Projektes wurde eine kostenneutrale Verlängerung notwendig und bewilligt (resultierende Gesamtdauer des Projektes: 42 Monate). Die Notwendigkeit für die Verlängerung lag in den Einschränkungen, die sich durch die COVID-19 Pandemie ergeben haben, begründet. Auswirkungen wie Lieferverzögerungen der Elektro- und Steuerungskomponenten oder aber auch Einschränkungen beim Zugang zu Laboren aufgrund der lokalen und staatlichen Vorgaben hinsichtlich Schutzmaßnahmen zur Eindämmung und Bekämpfung des Corona-Virus hatten unabwendbare Verzögerungen beim Bau der Demonstratoranlage zur Folge und die Versuchsdurchführung konnte weniger effizient als ursprünglich geplant durchgeführt werden.
Der Zeitplan dieses Teilvorhabens im Gesamtplan ist in den Arbeitspaketen 1 und 7 wiederzufinden.
Im Rahmen des AP 1 wurden unmittelbar zu Projektbeginn alle notwendigen Spezifikationen zur Realisierung der Demonstratoranlage festgelegt. Ein besonderes Augenmerk wurde auf die Integration der Einzelkomponenten gelegt, die von den Projektpartnern zugeliefert wurde. Im Schwerpunkt ging es hierbei um Gewichtsaspekte und um die Kommunikation der Einzelkomponenten mit basierend auf EtherCAD und konventionellen Schnittstellen.
Das Teilprojekt „Demonstratoranlage“ AP7 beinhaltete den Entwurf (TAP7.1), das Einrichten (TAP7.2) sowie die Übertragung der Laborergebnisse (TAP7.3) auf die industrienahe Demonstratoranlage. Weiterhin wurde die erstellte Softwarelösung gemäß den Erfordernissen der Demonstratoranlage angepasst (TAP7.4).

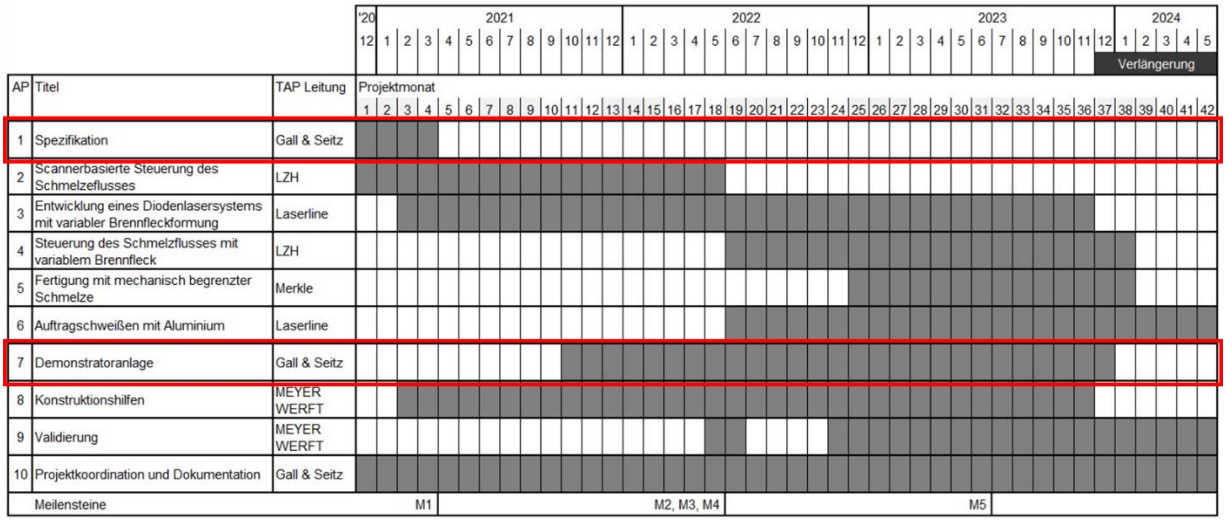

Abbildung 1: Zeitplan des Gesamtprojektes mit Teilprojekt „Demonstratoranlage“ AP7

Die entscheidenden Meilensteine (MS) für dieses Teilvorhaben gliederten sich wie folgt:

- MS1: Spezifikationsdokument (s. AP1) steht zur Verfügung
- MS2: Prozessparameter und Beschreibung der Prozessführungsstrategien zur Fertigung mit scannergesteuertem Schmelzfluss (AP2) sind verfügbar
- MS3: Demonstratoranlage ist aufgebaut

- MS4: Diodenlasersystem – ohne Einfluss auf dieses Teilvorhaben.
- MS5: Entwicklungsergebnisses aus TAP 8.1 bis 8.3 sind auf die Demonstratorbauteile übertragen

1.5 Wissenschaftlicher und technischer Stand der Technik

Eine ausführliche Darstellung des wissenschaftlichen und technischem Stand der Technik ist im Abschlussbericht des Gesamtvorhabens enthalten.
Hier wird eine Zusammenfassung bezüglich additiver Fertigungstechnologien dargestellt.

1.5.1 Additive Fertigungsverfahren

Der Begriff „Additive Fertigung“ fasst urformende Prozesse zusammen, bei denen pulver- oder drahtförmige Ausgangswerkstoffe verarbeitet werden. Grundsätzlich können mit diesen Techniken eine Vielzahl verschiedener Werkstoffe, wie Metalle, Kunststoffe, Verbundmaterialien und sogar biologisches Material verarbeitet werden [2].
Ausgehend vom Forschungsbereich über erste industrielle Anwendungen sind „Additive Fertigungsverfahren“ zunehmend einem breiteren Publikum als „3D-Druck“ bekannt. In diesen additiven Fertigungsverfahren werden Bauteile schichtweise aus einem hinzugefügten Material wie etwa Kunststoff, Kunstharz, Keramik oder Metall erzeugt oder erweitert. Eine typische im additiven Aufbauprozess angewandte Fertigungsstrategie ist es, die Erstellung der Außenhaut von dem Auffüllen des umschlossenen Innenraums zu trennen. So wird innerhalb einer Schicht die Kontur der späteren Außenhaut mit hoher Genauigkeit erzeugt, während das Auffüllen durch ein sogenanntes Hatching erzeugt wird. Durch eine geschickte Wahl des Hatch-Musters ist es beispielsweise möglich, anwendungsoptimierte Strukturen zu erzeugen, um eine Reduzierung der Bauteilmasse unter Beibehaltung der geforderten mechanischen Festigkeitseigenschaften zu erreichen. Die mit dieser Fertigungsstrategie verbundene Prozesskomplexität erfordert allerdings eine vollautomatische, programmgesteuerte Ausführung des Prozesses inklusive einer entsprechenden Fertigungsplanung. Algorithmen und Softwarewerkzeuge stehen dabei für die gängigen Prozesstypen zur Verfügung.
Additive Fertigungsverfahren können anhand der Zuführung des Zusatzstoffes grob in zwei Verfahrenstypen unterteilt werden. So wird, wie beispielsweise in stereolithographischen Verfahren, der Zusatzwerkstoff zunächst als flüssige oder pulverförmige Schicht über der zugrundeliegenden Struktur bereitgestellt. Der Zusatzwerkstoff wird dann durch ein selektives, lokal begrenztes Hinzufügen der erforderlichen Energie, etwa durch Laser- oder Elektronenstrahlen, an die darunter befindliche Struktur gebunden. Eine Alternative zu dieser Vorgehensweise ist das direkte Bereitstellen des Zusatzwerkstoffs ausschließlich am Ort der Energieeinwirkung und damit am Ort der Anbindung an die darunter befindliche Struktur. Beim Aufbauen von metallischen Strukturen wird der Zusatzwerkstoff häufig in Drahtform zugeführt und etwa durch einen Laserstrahl aufgeschmolzen. Ebenso kann der

metallische Zusatzwerkstoff in Pulverform mittels einer Düse als fokussierter Pulverstrahl in den Bereich des Laserstrahls eingebracht werden.

Beim Auftragschweißen mit Laserstrahlung erhitzt der Laserstrahl das Werkstück und schmilzt es lokal auf. Gleichzeitig wird ein feines Metallpulver oder ein Metalldraht zugeführt, welche teilweise in der Schmelze oder vom Laserstrahl aufgeschmolzen wird und sich mit dem Grundwerkstoff verbindet. Mit diesem Verfahren können Auftragraten von bis zu 9 kg/h mit Aufmischungsgraden von 1-10 % erreicht werden. Dazu sind allerdings teure Hochleistungslaser notwendig. Durch die gezielte lokale Wärmeeinbringung der Laserstrahlung ist die Wärmeeinflusszone gering. Bei Anwendung einer Prozesskombination mit einem Induktor kann die Auftragrate noch um einen Faktor von 2-2,5 gesteigert werden. Die lokale Erwärmung mit dem Induktor kompensiert Wärmeverluste, so dass ein höherer Anteil der Laserstrahlung zum Aufschmelzen des Pulvers bereitsteht. [3]

Für großformatige Bauteile werden in der Regel Lichtbogenverfahren eingesetzt, welche allerdings aufgrund der hohen Energieeinbringung in die Bauteile zu einem hohen thermisch bedingten Verzug führen können. Aus diesem Grund werden auch bei Lichtbogenverfahren häufig die Auftragraten reduziert, wie beispielsweise im Fall von Titan und Aluminium etwa zu 1 kg/h oder 3 kg/h bei Stählen [4]. Gleichermaßen ergeben sich bei geringeren Auftragraten höhere Kontur- bzw. Detailgenauigkeiten. Damit hat die Auftragrate einen direkten Einfluss auf die Kosten der erforderlichen Nacharbeiten.

Anders als Laserauftragschweißverfahren arbeiten Lichtbogenschweißverfahren mit einem Plasma, welches zwischen einer Drahtelektrode und dem Werkstück brennt und dazu dient, die Werkstückoberfläche und das Zusatzmaterial aufzuschmelzen. Diese Verfahren bieten den Vorteil, relativ große Mengen Werkstoff kostengünstig auftragen zu können. Nachteilig wirkt sich jedoch die hohe Energieeinbringung aus, welche zu einem hohen Maß an Verzug und Aufmischung führt. So können 0,9 bis 5 kg/h Material mit Aufmischungsgraden zwischen 10 und 20 % aufgebracht werden. [5], [6], [7], [8]

Zur Erhöhung der Auftragrate wurde ein MSG-Tandemverfahren entwickelt, welches bis zu 20 kg/h aufbringen kann und dabei einen Aufmischungsgrad von unter 11 % erreicht [9]. Bei dem Verfahren fußen zwei voneinander unabhängige Lichtbögen in einem Schmelzbad. Durch die hohen Abschmelzleistungen der beiden Drähte ist das Verfahren trotz höherer Investitionskosten im Vergleich zu klassischen Lichtbogenauftragschweißverfahren wirtschaftlicher. Beim Auftragschweißen mit einem laserstabilisierten Lichtbogen wird der Lichtbogen durch einen Laserstrahl mit einer Leistung von circa 500 W stabilisiert. Der Auftreffpunkt des Lichtbogens auf dem Bauteil ist mit dem Auftreffpunkt des Laserstrahls identisch. Mit dem Prozess können Auftragraten von 0,8 bis 1,25 kg/h bei Aufmischungsgraden von unter 5 % realisiert werden [10].

1.5.2 Auftragschweißen mit dem LDNA-Verfahren

Zu den Auftragschweißverfahren gehört auch das am LZH experimentell entwickelte laserunterstützte Doppeldraht-Auftragschweißen mit nicht übertragenem Lichtbogen (LDNA-Verfahren) [11], welches hohe Abschmelzraten erreicht, indem ein Lichtbogen zwischen zwei abschmelzenden Drahtelektroden brennt. Beide Drähte werden stetig gefördert, wie es vom Metallschutzgasschweißen bekannt ist und der abgeschmolzene Zusatzwerkstoff gelangt unter Schwerkrafteinfluss auf die Bauteiloberfläche, wo er letztlich erstarrt. Mittels eines Laserstrahls ist es möglich, eine gut kontrollierbare, lokale Erwärmung der abgetropften Drahtschmelze und des Substratwerkstoffes zu erreichen, um eine sichere Anbindung der Auftragschicht an den Grundwerkstoff zu erhalten [12]. Ohne den Einsatz der Laserstrahlung, welche durch ein Scannersystem quer zur Schweißrichtung gependelt wird, prägt sich die Naht auf eine für Auftragschweißungen aufgrund entstehender Hinterschnitte ungewünschte Weise aus (Abbildung 10). Für Erklärungsansätze des zugrundeliegenden Mechanismus, wie beispielsweise die Beeinflussung der Oberflächenspannung und/oder der Viskosität der Schmelze und der daraus folgenden Nahtgeometrie fehlt noch die theoretische und die entsprechende experimentelle Untermauerung.

Mit dem LDNA-Verfahren kann eine Auftragrate von 7,5 kg/h bei einem Aufmischungsgrad von weniger als 5 % erreicht werden [13]. In ersten Untersuchungen konnte zwar die Abschmelzrate des Prozesses durch Erhöhung des Drahtvorschubs auf über 20 kg/h gesteigert werden, jedoch konnte keine sichere Anbindung erzielt werden. Gegenwärtig wird davon ausgegangen, dass die durch die Laserstrahlung in das Schmelzbad eingebrachte Wärme infolge der zu großen Anbindungsbreite nicht ausreicht, um zusammen mit der in der abtropfenden Schmelze vorhandenen Wärme ein hinreichendes Aufschmelzen der Werkstückoberfläche in den Randbereichen zu erzielen. Experimentelle Belege für diese Hypothese liegen allerdings nicht vor. Dennoch ist davon auszugehen, dass mit dem LDNA-Verfahren ein vielversprechendes Verfahren vorliegt, dass durch die hohen Auftragraten bei gleichzeitig geringem Aufmischungsgrad und dem Einsatz von Draht als Zusatzmaterial eine wirtschaftliche Alternative zu den verbreiteten Auftragschweißverfahren darstellt.

Von Partnern dieses Vorhabens (Merkle, LZH) wurde in einem Forschungsvorhaben das LDNA-Verfahren [1] zum Auftragschweißen von Beschichtungen entwickelt, bei dem im Gegensatz zu herkömmlichen Lichtbogenverfahren der Lichtbogen nicht auf das Bauteil übertragen wird (Abbildung 2). Dieses Verfahren bietet die Möglichkeit, den störenden Energieeintrag in das Bauteil im Sinne der Einbringung thermischer Energie in das Substrat signifikant zu senken. Der Lichtbogen brennt dabei zwischen zwei abschmelzenden Drahtelektroden oberhalb des Bauteils und ein Laserstrahl sorgt mit der notwendigen, gut kontrollierbaren lokalen Erwärmung des Auftreffbereichs der auf den Grundwerkstoff abtropfenden Drahtschmelze für die sichere Anbindung der Auftragschicht an den darunterliegenden Grundwerkstoff. Mit diesem Verfahren konnten beim Aufschweißen

großer Flächen schon Auftragraten von 7,5 kg/h erreicht werden. Die geringe thermische Belastung des Grundmaterials führte dabei vorteilhafterweise dazu, dass Aufmischungsgrade im Grenzbereich zweier Schichten auf maximal 5 % begrenzt wurden. Zwar konnten mit der in den Untersuchungen eingesetzten Systemtechnik Abschmelzraten von bis zu 20 kg/h erreicht werden, jedoch ließ sich damit im Rahmen des genannten Forschungsprojekts noch keine ausreichende Schichtqualität erzielen. [11], [12]

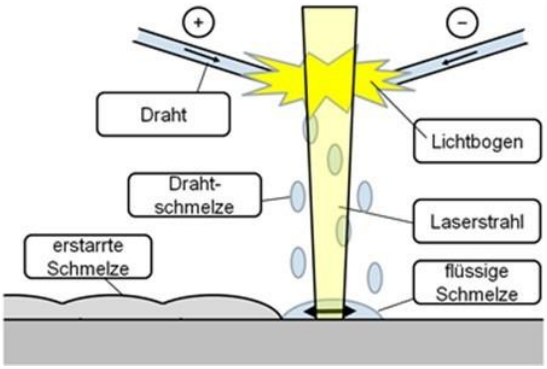

Abbildung 2: Prinzip des LDNA-Verfahrens

1.5.3 Mobiles Auftragschweißen

Gall & Seitz Systems besitzt umfangreiche Erfahrungen im Bereich des Laser-Pulver-Auftragschweißens aus einer über 15-jährigen Forschungs- und Entwicklungsgeschichte in Zusammenarbeit mit Laseranlagenherstellern und Forschungsinstituten aus dem Bereich der Lasertechnik. Zentrale Forschungsobjekte waren dabei beispielsweise die Rekonditionierung von Turboladern und Kolben von Hilfsdieselmotoren im maritimen Bereich. Mit fortschreitender Etablierung des Laser-Pulver-Auftragschweißens hat sich das Portfolio auf die Rekonditionierung großer (> 5 t) und immobiler Bauteile erweitert. Hierzu wurden bei Gall & Seitz Systems zwei mobile Laseranlagen geschaffen, mit denen vor Ort geschweißt werden kann. Die Applikationen erstrecken sich hierbei von Rekonditionierungsaufgaben in anderen Werkstätten über Laser-Schweißarbeiten an Turbinengehäusen bis hin zu Anwendungen in bzw. an Schiffsmotoren im eingebauten Zustand. So zeigt beispielsweise Abbildung 3 das Rekonditionieren einer POD-Welle im eingebauten Zustand mittels eines robotergestütztem Laser-Pulver-Auftragschweißprozess.

Abbildung 3: Laser-Pulver-Auftragschweißen an Welle von POD-Antrieben

2 Eingehende Darstellung

Im Folgenden wird eine eingehende Darstellung der im Projekt erfolgten Entwicklungen aufgeführt. Es werden zunächst die Projektergebnisse der einzelnen Teilprojekte ausführlich dargestellt. Anschließend folgt die Aufführung der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises der einzelnen Projektpartner. In Abschnitt 2.4 wird die voraussichtliche Verwertbarkeit der Ergebnisse für die einzelnen Projektpartner aufgeführt. Weiterhin werden in Abschnitt 2.3 die Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit, in Abschnitt 2.5 die während des Vorhabens bekannt gewordenen Fortschritte bei anderen Stellen sowie in Abschnitt 2.6 die erfolgten und geplanten Veröffentlichungen in Verbindung mit dem hier dargestellten Verbundprojekt aufgeführt.

2.1 Verwendung der Zuwendung im Teilprojekt

Im Folgenden werden die erzielten Ergebnisse und die damit einhergehende Darstellung der verwendeten Zuwendung aufgeführt. Die Ergebnisse werden den vorgegebenen Zielen gegenübergestellt. Es werden nachfolgend die Ergebnisse der Teilprojekte erläutert.

2.1.1 AP1 Spezifikation

Gall & Seitz Systems hat in AP1 in Zusammenarbeit mit allen Projektpartnern die technischen Anforderungen an das Verfahren spezifiziert. Hierbei wurden insbesondere die Rahmenbedingungen des schiffbaulichen Umfelds wie beispielsweise die Betriebssicherheit einer Laseranlage oder roboterbasierter Anlagen beachtet. Aus den gesammelten Anforderungen wurden konkrete Anforderungen an die zu entwickelnde Fertigungsanlage abgeleitet. Neben der Spezifikationen zur Anlagentechnik im Versuchsfeld der Meyer Werft, wurde intensiv ein Konzept für einen Mini-Bearbeitungskopf, der ein maximales Gewicht von 5 kg aufweisen darf, gearbeitet. Hintergrund der Gewichtsbegrenzung ist der geplante Einsatz an einem Kuka KR6 Roboter in einem mobilen Bearbeitungssystem von Gall & Seitz Systems. In der Entwurfsphase wurden Komponenten wie die Schweißbrenner und die optischen Komponenten wie bspw. Kollimator oder Fokussierlinse festgelegt.
An der Auswahl der Demonstratorbauteile sowie bei der Festlegung der Prüfverfahren für die Beurteilung der erzielten Eigenschaften der Demonstratorbauteile wurde mitgearbeitet. Zudem wurden die gesammelten Spezifikationen zusammen mit den Partnern in einem Spezifikationsdokument zusammengestellt.

2.1.2 AP7 Demonstratoranlage

Im Rahmen dieses AP wurde in enger Zusammenarbeit mit den Projektpartnern eine Demonstratoranlage für den mobilen Ansatz des Verfahrens entwickelt. Dazu wurden in enger Abstimmung mit allen Projektpartnern weitere Anforderungen an einen gewichtsoptimierten Bearbeitungskopf identifiziert, welcher sich aufgrund seiner Adaptierbarkeit an Roboter mit

geringerer Tragfähigkeit für den mobilen Einsatz im Sinne von Reparaturarbeiten von unikaten Schiffbauteilen besonders eignet.
Das ausschlaggebende Kriterium für die Wahl der jeweiligen Komponenten war das Gewicht. Aus diesem Grund wurde bei den Schweißbrennern auf ein leichteres Modell (SB 504 W) von Merkle zurückgegriffen.
Die optischen Komponenten sind ein 1“-Optiken aus der OTS-1 Serie von Laserline. Kollimiert wird der Laserstrahl mit einer Brennweite von 51 mm ehe die Strahlung durch einen Spiegel um 90° umgelenkt und dann mit einer Brennweite von 300 mm fokussiert wird. Daraus resultiert eine Fokusspotgröße von ca. 2,4 mm.
Der Galvanometerscanner, der Crossjet sowie die Schutzgläser wurden durch das LZH beigestellt.
Die ausgearbeiteten Entwürfe wurden konsortiumsübergreifend beurteilt und freigegeben.

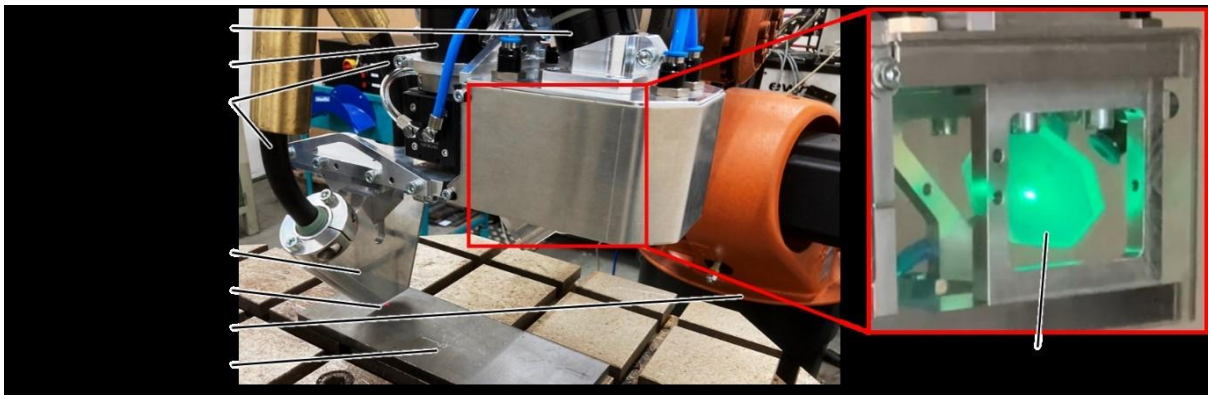

Abbildung 4: Detaillierte Darstellung des montierten Mini-Bearbeitungskopfes mit einem Gewicht von 5 kg

Der resultierende Bearbeitungskopf wurde mit einem Gesamtgewicht von weniger als 5 kg erfolgreich in einer produktionsnahen Umgebung (siehe Abbildung 5 links)

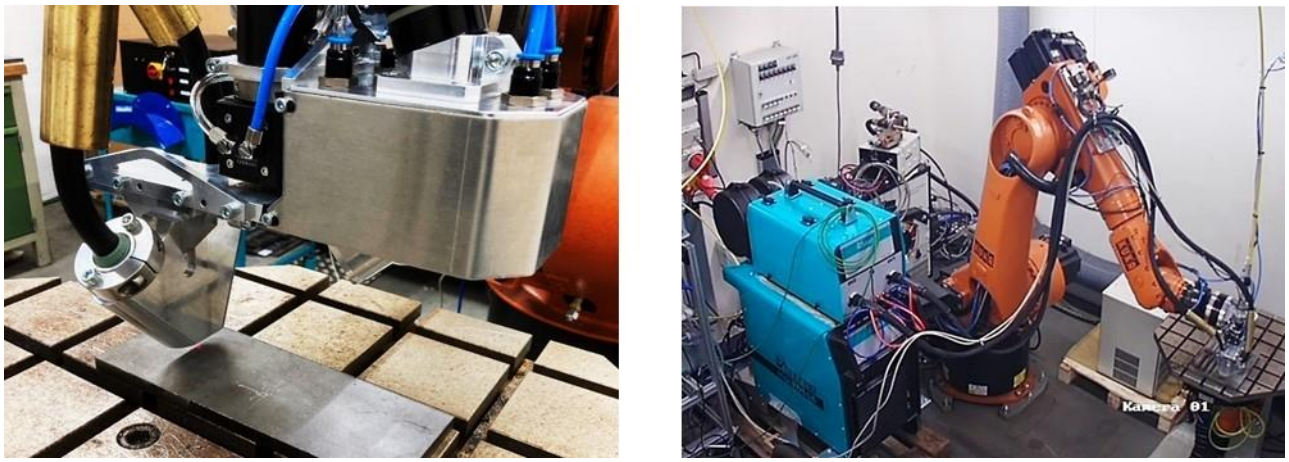

Abbildung 5: Mini-Schweißkopf montiert am KUKA-Roboter, Ansicht des Versuchsstands – hier mit einem großen KUKA-Roboter

Der am Roboter montierte Bearbeitungskopf ist in Abbildung 5 links dargestellt. Auf der rechten Seite ist der Bearbeitungskopf ohne Einhausung mit Pilotlaserstrahlung auf einem Umlenkspiegel eines einachsigen Galvanometerscanners gezeigt. Die Erprobung des Systems wurde mit einer Diodenlaserstrahlquelle LDM3000-40, die vom Projektpartner Laserline zur Verfügung gestellt wurde, durchgeführt. Die Strahlquelle emittiert mit Wellenlängen im Bereich von 960-1040±15 nm bei einer maximalen Leistung von 3000 W. Die verwendete Faser hat einen Kerndurchmesser von 400 µm. Einfache wandartige Strukturen konnten somit hergestellt werden. Es konnte gezeigt werden, dass der Bearbeitungskopf die grundlegenden Funktionalitäten, wie die des Bearbeitungskopfes mit einachsigem Bewegungsprofil abbilden kann.
Die grundlegenden Untersuchungen zum Bereit des Bearbeitungskopfes, die Einstellung des notwendigen Prozessparameter und Untersuchungen zum Start-Stopp-Verhalten wurden im LZH durchgeführt.
Mit den grundlegenden Parametern wurde der Bearbeitungskopf inkl. Strom- und Laserquelle bei Gall & Seitz in einer für dieses Projekt beschaffte mobile Anlage integriert.
Alle grundlegenden Parameter konnten direkt übertragen werden. Es wurde nachgewiesen, dass die Schnittstellendefinition und die Schnittstellenbeschreibungen mit geringem Aufwand vom Labor-System auf die mobile Anlage von Gall & Seitz übertragen werden konnte.

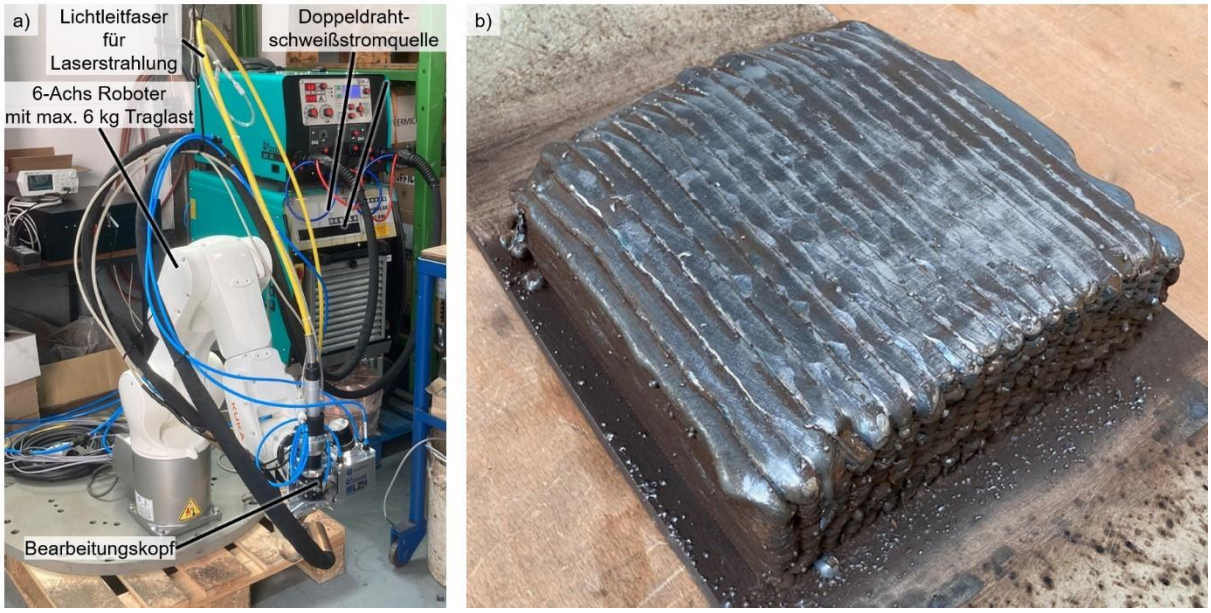

Abbildung 6: Demonstratoranlage mit gewichtsoptimiertem Bearbeitungskopf für den mobilen Einsatz (links), Probekörper für die Entnahme von Proben für zerstörende Prüfverfahren (rechts)

Zur Herstellung von Fatigue Probekörpern sowie eines Probekörpers zur Entnahme von Proben für zerstörende Prüfverfahren (siehe Abbildung 6 rechts) eingesetzt. Dazu wurden die vom LZH entwickelten Prozessparameter auf die mobile Demonstratoranlage übertragen und geringfügig auf die veränderten Umgebungsbedingungen angepasst. Somit konnte erfolgreich gezeigt werden, dass die zu entwickelnde Prozesstechnik in eine mobile Anwendung implementiert werden kann und Potential für eine Weiterentwicklung der Systemtechnik für eine weitere

Erhöhung des technischen Reifegrades vor allem in Bezug auf Reparaturanwendungen großskaliger Bauteile beinhaltet.

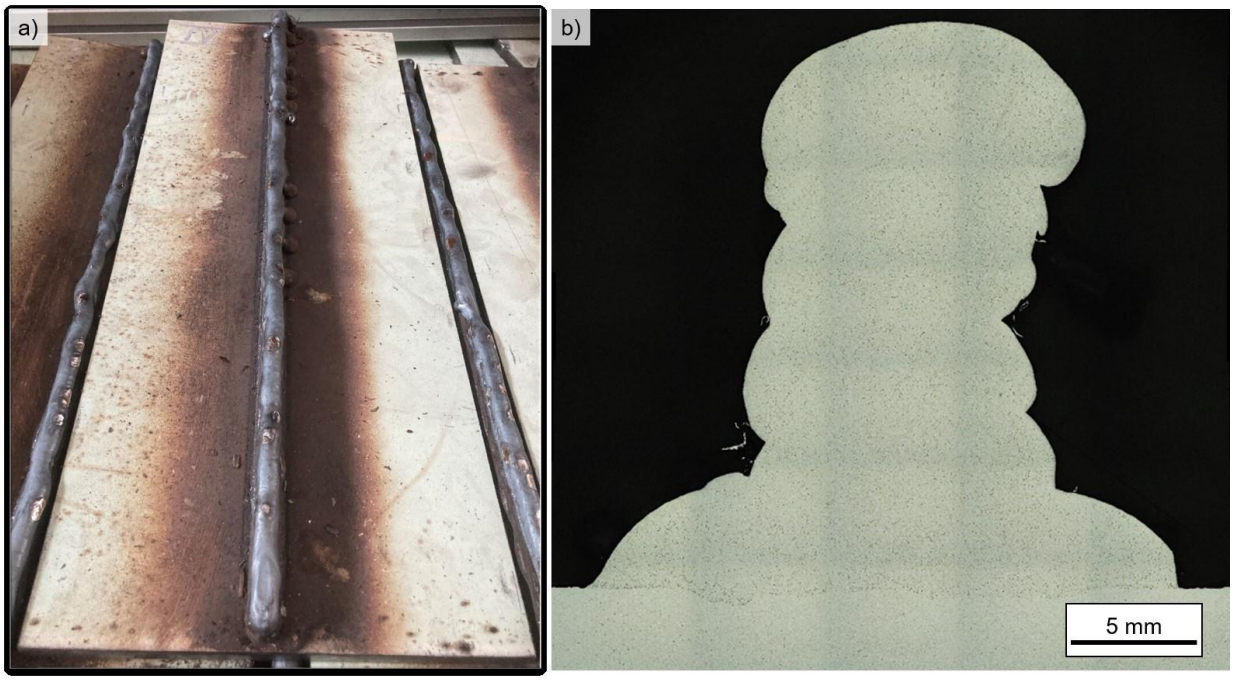

Abbildung 7: Fatigue Probekörper (links) und Querschliff eines Fatigue Probekörpers (rechts)

Die hergestellten Fatigue Probekörper, die in Abbildung 7 links gezeigt sind, wurden der MEYER WERFT für die Bestimmung der Kennwerte bereitgestellt. Zudem hat eine metallografische Untersuchung der Probekörper stattgefunden (siehe Abbildung 13 rechts), die grundlegend keine Anbindungsfehler und Defekte gezeigt hat.
Dem Probekörper für die zerstörenden Prüfverfahren wurden Rundzugproben nach DIN EN ISO 6892 Form A in allen drei Raumrichtungen entnommen und geprüft. Die Ergebnisse der oberen Streckgrenze ReH, der Zugfestigkeit Rm und der Bruchdehnung A sind in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Ergebnisse der Zugprüfung des Prüfkörpers hergestellt mit der mobilen Anlage bei Gall & Seitz Systems

Probe	R_{eH} in MPa	R_m in MPa	A in %
x-Richtung	422	540	18,3
y-Richtung	459	578	29,4
z-Richtung	424	525	13,3
Mittelwert	440	555	22,4
Standardabweichung	36	35	9,5

Die Festigkeitswerte der bei Gall & Seitz gefertigten Proben zeigen in allen Raumrichtungen ähnliche Festigkeitswerte mit einem Mittelwert von 555 MPa und einer Streckgrenze von 440 MPa.
Die Dehnung in z-Richtung ist im Vergleich zu den planaren Richtungen (x und y) deutlich geringer. Dies wird auf oxidische Einlagerungen zwischen den Lagen zurückgeführt und ist bei AM-Bauteilen ein häufig beobachteter Effekt.
Im Vergleich zu den Festigkeitswerten, die an Probe ermittelt wurden, die beim LZH hergestellt wurden (Tabelle 2), ist auffällig, dass die LZH-Proben höhere Umformgrade erreichen, das Festigkeitsniveau insgesamt etwas höher liegt, die Proben von Gall & Seitz jedoch insgesamt eine gleichmäßigere Festigkeit in Bezug auf die Raumrichtungen aufweisen.

Tabelle 2: Ergebnisse aus den Zugversuchen des Prüfkörpers hergestellt mit der Versuchsanlage des LZH

Probe	R_{eH} in MPa	R_m in MPa	A in %
x-Richtung	461	573	28,6
y-Richtung	433	556	32,2
z-Richtung	494	600	14,7
Mittelwert	453	569	28,3
Standardabweichung	44	36	7,1

Die Schwingfestigkeitsuntersuchungen an den bei Gall & Seitz hergestellten Proben wurden unter Federführung von der Meyer Werft durchgeführt und sind im Gesamtbericht nachzulesen.

2.1.2 Projektübergreifender Workshop

Unabhängig vom Arbeitsplan wurde ein projektübergreifender Workshop mit den internationalen Projekten FlexiMan und GREEF sowie mit einem Vertreter des DNV organisiert und durchgeführt. Hierbei wurde sich zu Themen der Additiven Fertigung zwischen Industrie und Forschungsinstituten ausgetauscht. Weiterhin wurde ein Schwerpunkt auf die Diskussion der Teilnehmenden zu der Thematik „Additive Fertigung: Anwendung vs. Standardisierung“ sowie zur „Industrialisierung von Additiver Fertigung im maritimen und Offshore-Bereich: Vorteile und Herausforderungen“ gelegt. Des Weiteren wurde die Additive Fertigung aus Sicht der Klassifizierungsgesellschaft sowie auch die Normen und Leitlinien für den Einsatz von Directed Energy Deposition vorgetragen.

2.3 Während des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt bei anderen Stellen

Während der Durchführung des Vorhabens wurden keine Fortschritte an anderen Stellen bezüglich der additiven Fertigung mittels des laserunterstützten Doppeldraht-Auftragschweißens mit nichtübertragenem Lichtbogen bekannt. Lediglich im Bereich der reinen Lichtbogentechnik ist ein Ergebnis zu einem Multidrahtsystem mit nichtübertragenem Lichtbogen bekannt. Bei

diesem Prozess brennt der Lichtbogen zwischen zwei Drahtelektroden und mit einem dritten Draht wird während des Prozesses legiert. Explizite Ergebnisse liegen zum Prozess, zum Gefüge und zu mechanischen Eigenschaften einer in-situ erstellten Aluminiumlegierung (Al-Zn-Mg-Cu) vor. [15]

2.4 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen

Erfolgte Veröffentlichungen sind in Tabelle 3 aufgeführt.

Tabelle 3: Erfolgte und geplante Publikationen über das Projekt FLEXIGEN

Datum	Titel der Publikation	Autoren	Medium
Erfolgte Publikationen			
02.11.2022	Entwicklung eines Bearbeitungskopfes für einen laserunterstützten Doppeldrahtauftrag-schweißprozess mit nichtübertragenem Lichtbogen	Silas Müller-Zitzke	Masterarbeit am LZH
21.09.2023	Development and evaluation of a compact processing head for Additive Manufacturing with laser-assisted double-wire welding with nontransferred arc	Kai Biester (LZH)	Vortrag Innovative Product Development by Additive Manufacturing 2023 (IPDAM 2023)
31.10.2023	Novel Welding Strategies in the High Deposition Rate Laser-assisted Double Wire Welding Process with Non-transferred Arc	Kai Biester, Nick Schwarz, Jörg Hermsdorf, Stefan Kaierle (alle LZH)	Solid Freeform Fabrication 2023: Proceedings of the 34th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium – An Additive Manufacturing Conference

29.12.2024	Development and evaluation of a compact processing head for Additive Manufacturing with laser-assisted double-wire welding with nontransferred arc	Kai Biester, Marius Bernaschek, Marius Lammers, Alexander Barroi, Nick Schwarz, Jörg Hermsdorf, Stefan Kaierle (LZH), Sörn Ocylok, Volker Krause (Laserline), Ulrich Prank (Merkle), Florian Wagner (Gall & Seitz), Richard Banaschik (MEYER WERFT)	Springer Buch: Innovative Product Development by Additive Manufacturing 2023
05.12.2024	FLEXIGEN - Flexible und effiziente Generierung von unikaten Schiffsbauteilen mittels eines innovativen laserunterstützten additiven Fertigungsprozesses	Florian Wagner (Gall & Seitz)	Vortrag Statustagung Maritime Technologien 2024
12/2024	FLEXIGEN - Flexible und effiziente Generierung von unikaten Schiffsbauteilen mittels eines innovativen laserunterstützten additiven Fertigungsprozesses	Kai Biester, Nick Schwarz, Jörg Hermsdorf , Stefan Kaierle (LZH), Sörn Ocylok, Volker Krause (Laserline), Ulrich Prank (Merkle), Florian Wagner (Gall & Seitz), Richard Banaschik (MEYER WERFT)	Statustagung Maritime Technologien – Tagungsband zur Statustagung 2024

3 Literaturverzeichnis

[1] “Gemeinsamer Ergebnisbericht zum KMU-innovativ-Verbundprojekt „HoDopp: Hochleistungsauftragschweißen mit Doppeldrahttechnik bei nicht übertragenem Lichtbogen und Laser gestützter Einbrandsteuerung“,” 2014.

[2] W. E. Frazier, “Metal additive manufacturing: A review,” *J Mater Eng Perform*, vol. 23, no. 6, pp. 1917–1928, 2014, doi: 10.1007/s11665-014-0958-z.

[3] F. Brückner, S. Nowotny, and C. Leyens, “Innovations in laser cladding and direct metal deposition,” in *Proc. SPIE 8239*, E. Beyer and T. Morris, Eds., Feb. 2012, p. 823904. doi: 10.1117/12.906706.

[4] S. W. Williams, F. Martina, A. C. Addison, J. Ding, G. Pardal, and P. Colegrove, “Wire + Arc additive manufacturing,” *Materials Science and Technology (United Kingdom)*, vol. 32, no. 7, pp. 641–647, 2016, doi: 10.1179/1743284715Y.0000000073.

[5] J. R. Davis, “Hardfacing, Weld Cladding, and Dissimilar Metal Joining,” in *Welding, Brazing, and Soldering*, ASM International, 1993, pp. 789–829. doi: 10.31399/asm.hb.v06.a0001442.

[6] H. J. Fahrenwaldt and V. Schuler, *Praxiswissen Schweißtechnik*. Wiesbaden: Vieweg, 2006. doi: 10.1007/978-3-8348-9192-1.

[7] A. S. Shahi and S. Pandey, “Effect of Auxiliary Preheating of the Filler Wire on Quality of Gas Metal Arc Stainless Steel Claddings,” *J Mater Eng Perform*, vol. 17, no. 1, pp. 30–36, Feb. 2008, doi: 10.1007/s11665-007-9132-1.

[8] P. Wen *et al.*, “Effect of welding parameters on dilution and weld bead geometry in cladding,” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 101, no. 3, pp. 1–14, 2020, doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.742.341.

[9] H. Cramer, “Werkstoffkundliche Bewertung von mit dem MIG/MAG-Tandemschweißen hergestellten Auftragschichten,” 2001.

[10] S. Kaierle, A. Barroi, C. Noelke, J. Hermsdorf, L. Overmeyer, and H. Haferkamp, “Review on Laser Deposition Welding: From Micro to Macro,” *Phys Procedia*, vol. 39, pp. 336–345, 2012, doi: 10.1016/j.phpro.2012.10.046.

[11] A. Barroi, J. Hermsdorf, U. Prank, and S. Kaierle, “A Novel Approach for High Deposition Rate Cladding with Minimal Dilution with an Arc – Laser Process Combination,” *Phys Procedia*, vol. 41, pp. 249–254, 2013, doi: 10.1016/j.phpro.2013.03.076.

[12] A. Barroi, J. Amelia, J. Hermsdorf, S. Kaierle, and V. Wesling, “Influence of the laser and its scan width in the LDNA surfacing process,” *Phys Procedia*, vol. 56, no. C, pp. 204–210, 2014, doi: 10.1016/j.phpro.2014.08.164.

[13] A. Barroi, J. Hermsdorf, S. Kaierle, and L. Overmeyer, “Influence of scan width and wire feed speed on seam geometry and the substrate surface in laser wire cladding,” in *Proceedings of ICALEO 2016*, 2016, p. 302. doi: 10.2351/1.5119070.

[14] G. Schulze, *Die Metallurgie des Schweißens*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010. doi: 10.1007/978-3-642-03183-0.

[15] L. Wang *et al.*, “A novel heterogeneous multi-wire indirect arc directed energy deposition for in-situ synthesis Al-Zn-Mg-Cu alloy: Process, microstructure and mechanical properties,” *Addit Manuf*, vol. 72, no. May, p. 103639, 2023, doi: 10.1016/j.addma.2023.103639.