

Schlussbericht

Verbundvorhaben:

**Formschlüssiges Laserstrahlschweißen der
Mischverbindung aus Stahl und Aluminium für
betriebsfeste Halbzeuge im Schiffbau
(FOLAMI)**

Teilvorhaben:

**Überführung des formschlüssigen Laserstrahl-
schweißens auf hochskalierten Halbzeugen aus Stahl
und Aluminium in werftnahe Umgebung**

Förderkennzeichen: 03SX547D

Vorhabenslaufzeit: 01. Juni 2021 - 31. Dezember 2024

LASER on demand GmbH

Burgdorf, 26.06.2025

ÜBERSICHT

Verbundvorhaben: Formschlüssiges Laserstrahlschweißen der Mischverbindung aus Stahl und Aluminium für betriebsfeste Halbzeuge im Schiffbau

Kurztitel: FOLAMI

Vorhabenslaufzeit: 01. Juni 2021 - 31. Dezember 2024

Projektkonsortium:

B.I.G. Technology Services GmbH

Coherent (Deutschland) GmbH

Fr. Lürssen Werft GmbH & Co. KG

Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF

Hilbig GmbH

LASER on demand GmbH

Laser Zentrum Hannover e.V.

MEYER WERFT GmbH

Precitec Optronik GmbH

Teilvorhaben: Überführung des formschlüssigen Laserstrahlschweißens auf hochskalierten Halbzeugen aus Stahl und Aluminium in werftnaher Umgebung

Leiter des Teilvorhabens:

Dr.-Ing. Oliver Meier

LASER on demand GmbH

Lise-Meitner-Str. 9

31303 Burgdorf

Tel.: +49 5136 8783-441

Fax: +49 5136 8783-441

E-Mail: om@laser-on-demand.de

INHALTSVERZEICHNIS

ABBILDUNGSVERZEICHNIS	III
I KURZE DARSTELLUNG	4
I.1 Aufgabenstellung	4
I.2 Voraussetzungen des Vorhabens	5
I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens	5
I.4 Anknüpfung an den wissenschaftlichen und technischen Stand	7
I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen	8
II EINGEHENDE DARSTELLUNG	10
II.1 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse	10
II.1.1.1 Grundlegende Prozessuntersuchungen und Konzeption	10
II.1.1.2 Demonstration von Verfahren und Prozesstechnik	18
II.2 wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	24
II.2.1 Materialkosten	24
II.2.2 Personalkosten	24
II.2.3 Reisekosten	25
II.2.4 Vorhabensspezifische Abschreibungen	25
II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	25
II.4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse	26
II.5 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	26
II.6 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse	26
III KURZFASSUNG – BERICHTSBLATT	27
IV DOCUMENT CONTROL SHEET	28
V DANKSAGUNG	29

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1:	Mobiler Container mit 5kW-Diodenlaser	10
Abbildung 2:	Konzepte für experimentellen Bearbeitungskopf von LOD	11
Abbildung 3:	Versuchsaufbau (links) und Schweißprozess (rechts).....	12
Abbildung 4:	Nahtausprägung, Einschweißtiefe & Anbindungsbreite bei Fokusbereich 330 µm.....	12
Abbildung 5:	Nahtausprägung, Einschweißtiefe & Anbindungsbreite bei Fokusbereich 500 µm.....	13
Abbildung 6:	Nahtausprägung, Einschweißtiefe & Anbindungsbreite bei Fokusbereich 820 µm.....	13
Abbildung 7:	Nahtausprägung, Einschweißtiefe & Anbindungsbreite bei Vorschub 0,8 m/min	14
Abbildung 8:	Nahtausprägung, Einschweißtiefe & Anbindungsbreite bei Vorschub 0,6 m/min	14
Abbildung 9:	Probenvorbereitung; Lage und Abstand der Nuten	16
Abbildung 10:	Versuchsaufbau mit 2x 4kW Diodenlaser in X-Anordnung.....	16
Abbildung 11:	Resultierende Nahtoberfläche in Abhängigkeit von Vorschub und Strahl- Schnittpunkt	17
Abbildung 12:	Resultierende Nahtquerschnitte in Abhängigkeit von Vorschub und Strahl- Schnittpunkt	17
Abbildung 13:	Mobiles und modulares CNC-Achs-System mit 3,8 m Verfahrweg (verlängerbar).....	18
Abbildung 14:	Mobile Demonstrationmsanlage mit 3,8 m Verfahrweg	20
Abbildung 15:	Geometrie des finalen Stahl-Aluminium-Adapters als Halbzeug	21
Abbildung 16:	Kamerabeobachtung während des Schweißprozesses.....	21
Abbildung 17:	Kabine und Werkstück nach dem Schweißen	22
Abbildung 18:	Querschliffe der Demonstrator-Halbzeuge; Nutabstand 8 mm (li.) bzw. 10 mm (re.)..	23

I KURZE DARSTELLUNG

Im Rahmen des gesamten Forschungsvorhabens erfolgte die Weiterentwicklung des lasergestützten Schweißverfahrens zum Fügen von dickwandigen Mischverbindungen aus Stahl und Aluminium durch Umsetzung eines neuartigen Ansatzes zur Erzeugung von Hinterschneidungsgeometrien im Fügequerschnitt mittels zweier schräg verlaufenden Laserstrahlen. Dieser Effekt ist mit der Wirkung eines Stanzniets vergleichbar, welcher ein bewährtes mechanisches Fügeverfahren darstellt. Der Vorteil des geplanten Laserschweißkonzepts ist jedoch die linien- statt punktförmige Fügeverbindung mit deutlich erhöhten Traglasten.

Das Kernziel des vorliegenden Teilprojekts von LOD lag in der Übertragung der neuen Schweißmethode auf praxisrelevante Einsatzfälle in Form von langen Halbzeugen aus Stahl und Aluminium mit anforderungsgerechten Eigenschaften. Basierend auf den Erfahrungen von LOD bei der Laserbearbeitung von Großbauteilen wurde schon während der Entwicklungsphase der Fokus auf das Erreichen eines robusten Prozesses mit reproduzierbar hoher Qualität gelegt. Parallel zur Prozessentwicklung unter Laborbedingungen am LZH erfolgte diese in den Fertigungshallen von LOD unter werftnaher Umgebung. Zuvor wurde der auf Grundlage der gewonnenen Erkenntnisse aus den grundlegenden Untersuchungen von LOD und LZH ein regelungsfähiger Schweißkopf entwickelt. Die Schweißversuche erfolgten nach der Integration des Schweißkopfes mittels umfangreicher Untersuchungen zur Herstellung von langen, anforderungsgerechten Halbzeugen. Ziel war es, der maritimen Industrie ein praxistaugliches Verfahren bereit zu stellen, mit dem derartige Halbzeuge effizient, prozesssicher und kostengünstig gefertigt können.

I.1 Aufgabenstellung

Um die in der Gesamtverbundbeschreibung gesetzten Ziele zu erreichen, waren innerhalb des Teilprojekts die folgenden Schritte notwendig:

- Auswahl und Benennung von Bauteilen sowie innovativen Fügeverbindungen, bei denen der Einsatz von Mischverbindungen in Form von laserstrahlgeschweißten Halbzeugen von Vorteil ist
- grundlegende Prozessentwicklung zum Laserstrahlfügen von hybriden Stahl-Aluminiumverbindungen im Dickblechbereich (bis 10 mm Stahlblech) sowie Bewertung dieses Prozesses
- Vorbereitung der Integration eines Bearbeitungskopfes mit integrierter Einschweißtiefenregelung an eine Schweißanlage (Diodenlaser, Festkörperlaser)

- Mitausarbeitung von Regularien für die Durchführung des Schweißprozesses unter werfthnaher Umgebung und Prüfung der Mischverbindungen aus Stahl und Aluminium
- Fertigung von Funktionsmustern mit Hilfe des entwickelten Fügeprozesses
- Evaluierung der industriellen Umsetzbarkeit des entwickelten Fügeprozesses unter werfthnahen Bedingungen

I.2 Voraussetzungen des Vorhabens

XXX

I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Vorhaben startete in AP1 mit der Auswahl konkreter Anwendungsfälle in Form einzelner Bauteile oder Bauteilgruppen, bei denen eine Verwendung einer hybriden Stahl-Aluminium-Verbindung sowohl technologisch als auch wirtschaftlich sinnvoll erschien. Dies erfolgte in enger Zusammenarbeit mit den Instituten und den Endanwendern, LOD brachte dabei seine Erfahrungen im Laserschweißen von Großbauteilen ein.

Anschließend wurden die Anforderungen an die Halbzeuge und den Schweißprozess konkretisiert und in einem Lastenheft dokumentiert. Ziel war es, die relevanten Eigenschaften für die zu erzeugende Stahl-Aluminium-Mischverbindung herauszuarbeiten. Für die Umsetzung der laserstrahlgeschweißten Stahl-Aluminium-Verbindung im Schiffbau waren über die technologische Realisierbarkeit hinausgehend die Voraussetzungen für den Einsatz in geschweißten Schiffstrukturen zu berücksichtigen.

In AP2 sind die grundlegenden Schweißuntersuchungen erfolgt. LOD unterstützte zum einen den Aufbau des Versuchsstands am LZH bereits mit Augenmerk auf eine spätere Übertragbarkeit auf die langen Halbzeugen unter werfthnahen Bedingungen bei LOD. Darüber hinaus wurde parallel ein Versuchsaufbau bei LOD realisiert. Bei LOD kamen mehrere Diodenlaser mit jeweils 4 kW zum Einsatz.

Die Schweißprozesse wurden für dickwandige Mischverbindungen mit formschlüssiger Kraftübertragung anhand von Blechen unter Benutzung des fertiggestellten Laserprozesskopfs im Labor des LZH als auch bei LOD entwickelt. Für die Versuchsserie kamen die in AP1 festgelegten Stähle und Aluminiumlegierungen mit den unterschiedlichen Blechstärken zum Einsatz. Die Schweißuntersuchungen erfolgen an einer I-Naht im Überlappstoß, bei der das Stahlblech oben und das Aluminiumblech unten positioniert wird.

LOD unterstützte bei der Auslegung und Modifizierung des Laserbearbeitungskopfes mit integriertem Spektrometer am LZH, insbesondere mit Anforderungen aus Anwendersicht. Darüber hinaus war bei LOD der Einsatz von Diodenlasern mit unterschiedlicher Strahlqualität geplant, die durch Kopplung zu einem Strahlquerschnitt mit einstellbarer Intensitätsverteilung führen. Daher erfolgte der Aufbau einer Versuchsoptik bei LOD, welche sowohl im Rahmen der Prozessentwicklung als auch für die Herstellung der Halbzeuge zum Einsatz kommen sollte. Hier war als alternativer Ansatz der Aufbau einer Doppelloptik unter Einsatz von je zwei identischen Laserstrahlquellen (je 2x 4kW-Diodenlaser vom Typ Laserline LDF 4000-30 und LDF 4000-100) vorgesehen. Dies sollte neue Erkenntnisse im Vergleich zum Einsatz am LZH erlauben, welche in die finale Ausgestaltung mit einfließen. Die Evaluierung der aufgebauten Optiklösungen erfolgte in enger Zusammenarbeit mit dem LZH. Dies betraf sowohl die am LZH als auch die bei LOD verwendete Systemtechnik.

Ergänzend zu den Untersuchungen am LZH erfolgte bei LOD die Prozessentwicklung mit dem Schwerpunkt des Einsatzes von Hochleistungs-Diodenlasern. Standardmäßig sind bei LOD jeweils mind. zwei baugleiche Systeme mit 4 – 5 kW Leistung und einer Strahlqualität von 30 bzw. 100 mm mrad verfügbar, welche durch Koppelung sowohl die Leistungsskalierung als auch die geschickte Nutzung der unterschiedlichen Strahlqualitäten zur Erzeugung gewünschter Strahlprofile ermöglichen. Diese Untersuchungen erfolgen zunächst an einfachen Versuchsteilen mit I-Naht am Überlappstoß.

Die Schweißungen wurden mit Hilfe von zerstörenden und zerstörungsfreien Prüfungen ausgewertet. Die Auswertung der Schwingfestigkeitsuntersuchungen wurde von LOD durch Abgleich mit den Prozessdaten unterstützt. Diese ermöglichen es zu evaluieren, welche Effekte auf welche prozesstechnischen Unterschiede zurückzuführen sind. Diese Erkenntnisse flossen in die finale Prozessgestaltung zur Herstellung der anwendungsnahen Halbzeuge mit ein.

Um die industrielle Tauglichkeit der neuen Schweißmethode aufzuzeigen, wurden abschließend Schweißuntersuchungen an Halbzeugen mit einer Länge von 3500 mm in werftnaher Umgebung primär von LOD durchgeführt. Dabei war es das Ziel, lange Halbzeuge mit anforderungsgerechten Eigenschaften zu erzeugen. Die hierfür notwendigen Prozesse wurden unter Verwendung der gewonnenen Erkenntnisse aus AP2 und AP5 in enger Zusammenarbeit zwischen LZH, LOD, den Systemherstellern

und den Endanwendern entwickelt. Eine grundsätzliche Voraussetzung für eine erfolgreiche Prozessentwicklung mit dem Resultat einer qualitativ hochwertigen Schweißnaht stellt eine geeignete Spanntechnik dar. LOD hatte die Aufgabe, eine derartige Spanntechnik zu konzipieren, zu entwickeln und anschließend zu fertigen. Dadurch wurde die Grundlage für das Laserstrahlschweißen von langen Halbzeugen mittels neuer Schweißmethode gelegt. Die Schweißprozessentwicklung wurde an langen Halbzeugen durchgeführt, dabei wurden die Nähte hinsichtlich der resultierenden Eigenschaften in AP3 und AP6 charakterisiert.

Sämtliche gewonnenen Erkenntnisse und Erfahrungen wurden in Handlungsempfehlungen für die Umsetzung und Verwendung der neuen Schweißmethode gefasst. Dabei wurden die konkreten Anwendungsbeispiele aus AP1 und weitere mögliche Anwendungsbeispiele betrachtet. Nach Verbundprojektabschluss werden derartige Handlungsempfehlungen zudem Anwendern aus anderen dickblechverarbeiteten Industrien helfen, um letztendlich eine Entscheidung hinsichtlich einer Substitution konventioneller sprenggeschweißter Halbzeuge treffen zu können.

I.4 Anknüpfung an den wissenschaftlichen und technischen Stand

Im Rahmen des Forschungsvorhabens LaSAAS hat LOD das Schweißen von Stahl-Aluminium-Verbindungen durch Herstellung von Adapterstücken bis zu einer Länge von 2 m demonstriert. Dabei zeigte sich, dass die Länge solcher anwendungsnahen Halbzeuge eher von der Spannvorrichtung limitiert wird, nicht aber vom Prozess selbst. Durch eine geeignete Spanntechnik sollte diese Limitierung im aktuellen Forschungsvorhaben überwunden werden.

Während im Projekt LaSAAS ausschließlich mit senkrechter Einstrahlung zum Verschweißen gearbeitet wurde, kam in FOLAMI eine Zweistrahl-optik zum Einsatz, die durch Einstrahlwinkel von deutlich unter 90° einen Hinterschnitt der Schweißnähte im Aluminium erzeugt (ähnlich dem eines Stanzniets). Voruntersuchungen des LZH konnten das Potenzial dieser Lösung aufzeigen, welches nun im Rahmen des aktuellen Vorhabens für die Herstellung anwendungsnaher Halbzeuge entwickelt und demonstriert worden ist.

I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Zu Beginn wurden konkrete Anwendungsbeispiele aus dem Schiffbau in Zusammenarbeit aller VERBUNDPARTNER mit dem Ziel der Festlegung von adäquaten Halbzeugmaterialien und -strukturen ausgewählt. Bereits zum Verbundprojektbeginn begleitete der Unterauftragnehmer DNVGL als Klassifizierungsgesellschaft das Verbundprojekt, um potentielle Schwierigkeiten bei der Zulassung der neuen Schweißmethode in der Werft oder beim Halbzeughersteller nach dem Projektende zu vermeiden. Anschließend wurden grundlegende Schweißuntersuchungen zur Ermittlung geeigneter Schweißparameter und adäquate Halbzeuggeometrie in enger Zusammenarbeit zwischen LZH und LOD durchgeführt. Zuvor wurde ein Versuchsstand mit notwendiger Systemtechnik, bestehend aus einfachen konventionellen Laserprozessköpfen (ohne die Möglichkeit der Einschweißtiefenregelung), zur Umsetzung der neuen Schweißmethode sowohl im Labor des LZH als auch in den Fertigungshallen von LOD erstellt. Die iterative Prozessentwicklung erfolgte dabei durch eine Bewertung der mechanischen Kennwerte der Fügeverbindung, statische Versuche (LZH, LBF) und Schwingfestigkeitsversuche (LBF). Anschließend wurde ein geeigneter Laserprozesskopf mit Systemtechnik für das einschweißtiefengeregelte Laserstrahlschweißen entwickelt werden (HILBIG, LZH, LOD, BIG, PRECITEC, COHERENT). Unter Verwendung des entwickelten Laserprozesskopfes wurden die einschweißtiefengeregelten Laserstrahlschweißprozesse zu Beginn an einfachen Blechen und anschließend an Halbzeugen entwickelt. Auf Basis der Erkenntnisse aus diesen Versuchen sind Verbesserungsmaßnahmen zur iterativen Optimierung des Laserprozesskopfes den Systemherstellern (BIG, PRECITEC, COHERENT) übergeben und umgesetzt worden. In umfangreichen Untersuchungen (LZH, LOD) wurde die positive Wirkung der Einschweißtiefenregelung auf die statischen und zyklischen mechanischen Kennwerte der Mischverbindungen (LBF) herausgearbeitet. Im Rahmen der zyklischen Prüfungen sind vergleichende Untersuchungen (LBF) erfolgt, welche eine Einordnung des neuen Fügeverfahrens erleichtern und Aufschluss darüber geben, inwiefern numerische Ansätze zur Bewertung übertragbar sind. Darüber hinaus wurde mit Hilfe der experimentellen Ergebnisse ein Simulationsmodell entwickelt, mit dem eine Abschätzung der Schweißnahtqualität möglich ist. Zur Evaluierung der neuen Schweißmethode wurden lange Halbzeuge durch die Prozessentwickler (LOD, LZH) mit Unterstützung der Systemhersteller (BIG, PRECIETC) und den Endanwendern (HILBIG, LÜSSEN, MEYER) erzeugt. Derartige Halbzeuge wurden hinsichtlich Weiterverarbeitung, wie z. B. das

MSG-Schweißen des Halbzeugs an den Ausbauten und dem Schiffsrumpf, Fräsen der Halbzeuge, bewertet (HILBIG, LOD, LÜRSSEN, MEYER, LBF, LZH). Abschließend sind Funktionsmuster unter Verwendung der langen laserstrahlgeschweißten Halbzeuge hergestellt worden. Schlussendlich wurden diese neuen, geschweißten Strukturelemente mit herkömmlich gefügten Adaptern verglichen, um so eine realistische Bewertung des Laserstrahlschweißprozesses vornehmen zu können (LBF, LÜRSSEN, MEYER).

II EINGEHENDE DARSTELLUNG

II.1 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

II.1.1.1 Grundlegende Prozessuntersuchungen und Konzeption

Nach der projektübergreifenden Auswahl von Halbzeugen und Schweißnahtkonfigurationen im Arbeitspaket 1 (s. I.3) starteten die Schweißprozessentwicklung bei LOD im Rahmen des Arbeitspakets 2 sowie parallel die Konzepterstellung für den Laserbearbeitungskopf im Arbeitspaket 4. Während am LZH Scheiben- und Faserlaser zum Einsatz kamen, konzentrierte LOD seine Arbeiten auf den Einsatz von fasergekoppelten Hochleistungs-Diodenlasern. Diese stehen bei LOD mit unterschiedlichen Stahlqualitäten, die den minimal verwendbaren Faserdurchmesser definieren, bis zu einer Leistung von 4 bzw. 5 kW zur Verfügung. Diese Strahlquellen sind z.T. in Containern als mobile Einheiten installiert und können daher auch an anderen Orten (z.B. bei den Werften) zum Einsatz kommen (Abbildung 1).



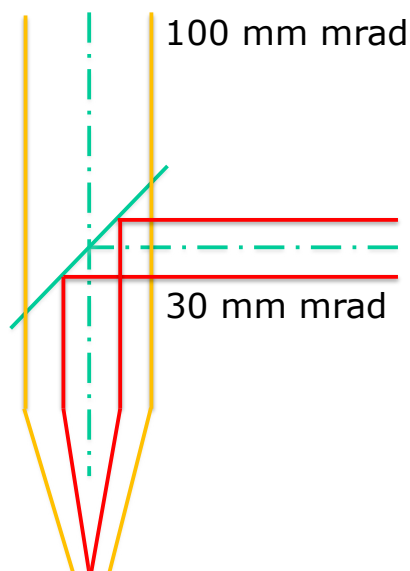
- Spezialcontainer (8 oder 20 Fuß), isoliert, batteriegepuffert beheizt, fernüberwacht
- 5kW-Diodenlaser (Laserline LDF 5000-30) mit 30m 600 μ -LLK
- Wasser-Luft-Kühler und Zubehör
- komplett betriebsbereit vorinstalliert
- vor Ort erforderlich: Strom je 1 x 16 und 32 A (ggf. per Generator)

Abbildung 1: Mobiler Container mit 5kW-Diodenlaser

Im vorliegenden Projekt ist vorgesehen, den Schweißnahtquerschnitt durch eine Anpassung der Intensitätsverteilung im Fokus so zu beeinflussen, dass ein möglichst stabiler Prozess mit minimaler Einschweißtiefe im Aluminium zur Minimierung von Aufmischung und resultierenden intermetallischen Phasen erreicht wird. Gleichzeitig soll die Anbindungsbreite möglichst groß sein, um eine ausreichende Festigkeit zu erzielen. Während am LZH die Verwendung einer Faser mit Kern und Ring erfolgt, in denen sich die Leistungen unabhängig einstellen lassen, bestand das Grundkonzept von LOD in der Überlagerung von Laserstrahlen verschiedener

Strahlqualitäten und resultierenden unterschiedlichen Fokusdurchmessern (Abbildung 2, Variante a). Alternativ wäre auch die Verwendung eines Strahlformungsmoduls vom Typ „Spot in Spot“ in Verbindung mit einem Laser höherer Leistung möglich (Abbildung 2, Variante b).

a) Kopplung versch. Strahlqualitäten



b) Spot-in-Spot-Modul

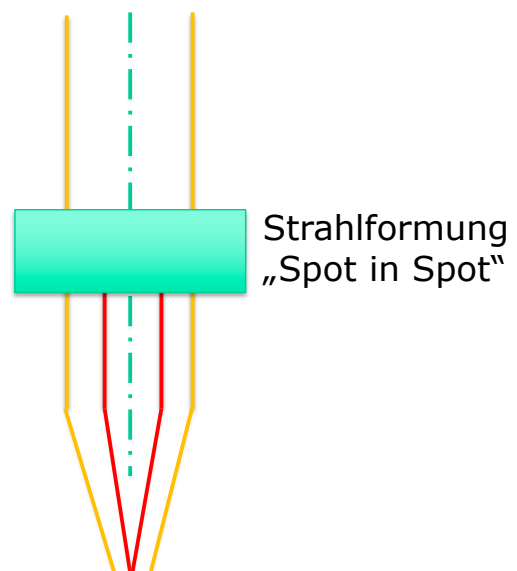


Abbildung 2: Konzepte für experimentellen Bearbeitungskopf von LOD

Während im finalen Prozess zwei sich kreuzende Strahlen darüber hinaus zu einer geometrischen Verklammerung durch Erzeugen eines Hinterschnitts erzielt werden soll – ähnlich dem Querschnitt eines Stanzniets, erfolgt zunächst die Betrachtung eines einzelnen Strahlverlaufs.

Da Strahlqualität und Faserdurchmesser maßgeblich den realisierbaren Fokusdurchmesser bestimmen (bei 1:1-Abbildung entspricht der Fokusdurchmesser dem Faserdurchmesser), hatten die ersten Untersuchungen zum Ziel, die für den FOLAMI-Prozess geeigneten Fokusdurchmesser zur Erzeugung unterschiedlicher Schweißnahtquerschnitte zu bestimmen. Dafür kamen folgende Parameter zum Einsatz:

konstante Parameter

- Nahtform: I-Naht am Überlapstoß
- Oberblech: S355, 5 mm
- Unterblech: Al 6082, 8 mm
- Laserleistung: 4 kW
- Wellenlängen: 900, 940, 980, 1030 nm
- Faserdurchmesser: 600 µm
- Fokuslage: 0 mm
- ohne Prozessgas

variable Parameter

- Fokusbereich: 330 bis 820 μm
- Geschwindigkeit: 0,3 bis 0,8 m/min

Versuchsaufbau und Schweißprozess sind in Abbildung 3 dargestellt.

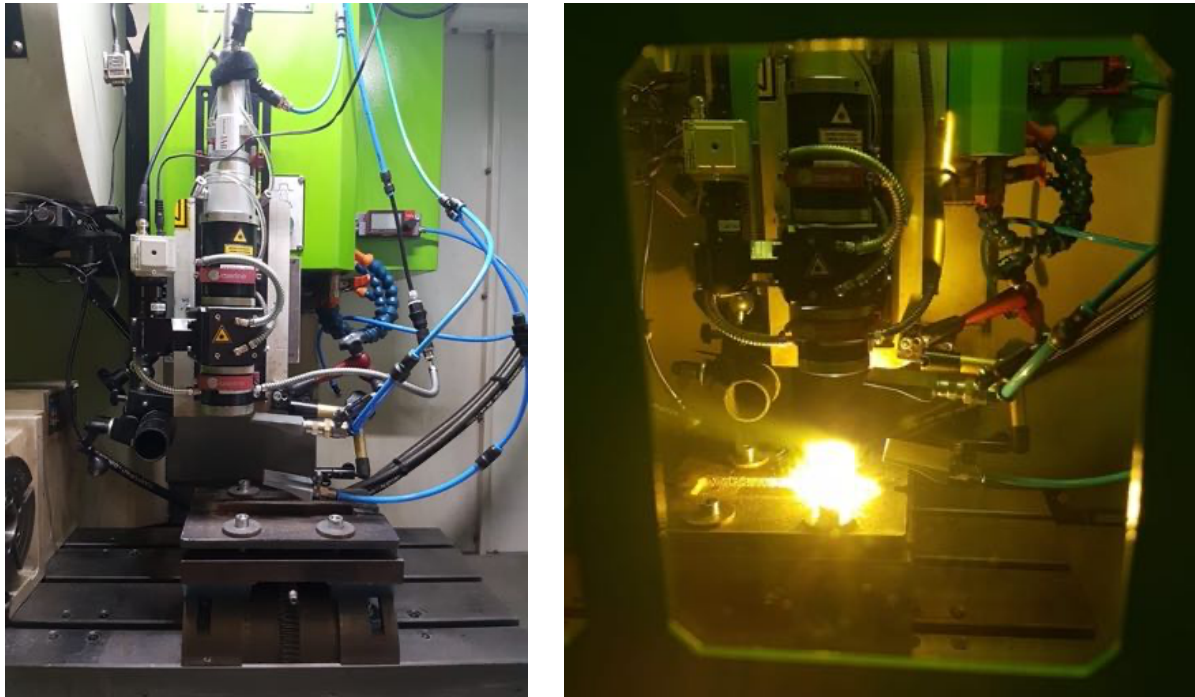


Abbildung 3: Versuchsaufbau (links) und Schweißprozess (rechts)

Die geometrische Nahtausprägung hinsichtlich Einschweißtiefe und Anbindungsbreite bei einem Fokusbereich von 330 μm zeigt Abbildung 4.

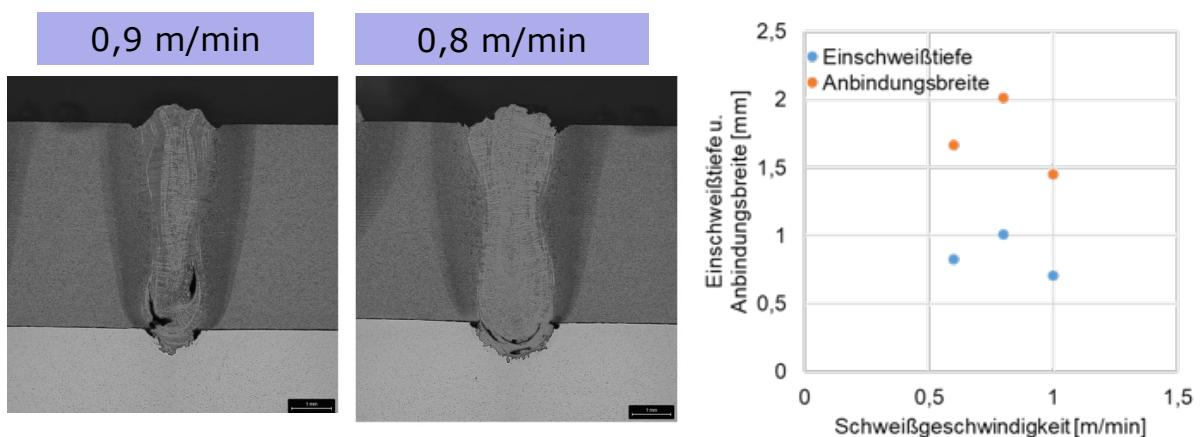


Abbildung 4: Nahtausprägung, Einschweißtiefe & Anbindungsbreite bei Fokusbereich 330 μm

Es zeigt sich, dass der Prozess signifikanten Schwankungen unterworfen ist, die sich auf un-
 stetige Änderungen von Einschweißtiefe und Anbindungsbreite auswirken. Dies ist ggf. auf
 den großen Divergenzwinkel und die geringe Rayleigh-Länge aufgrund der kurzen Fokussier-
 brennweite zurückzuführen.

Die resultierende Nahtausprägung, Einschweißtiefe und Anbindungsbreite bei einem Fokus-
 durchmesser von 500 µm zeigt Abbildung 5.

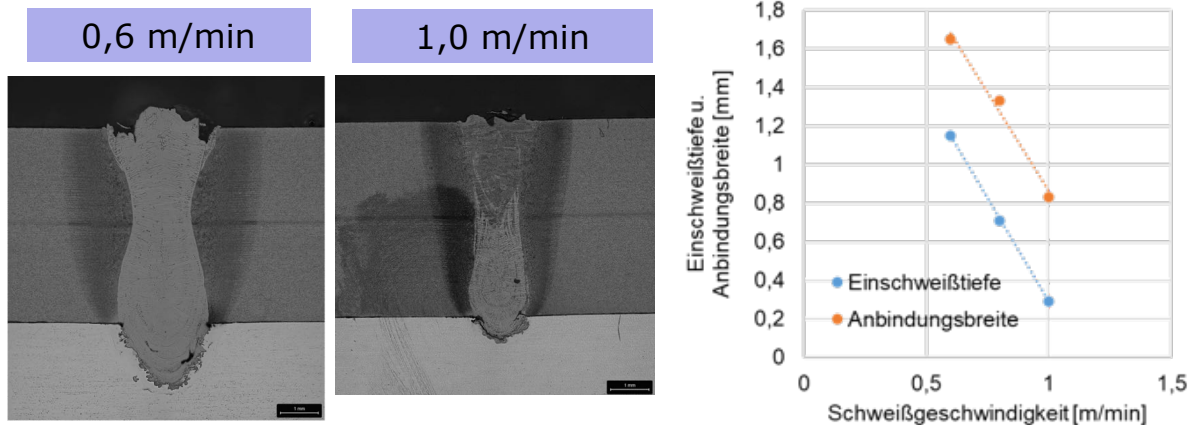


Abbildung 5: Nahtausprägung, Einschweißtiefe & Anbindungsbreite bei Fokusdurchmesser 500 µm
 Bei zunehmender Schweißgeschwindigkeit nehmen Einschweißtiefe und Anbindungsbreite er-
 wartungsgemäß ab. Gleichzeitig ergibt sich eine Verbesserung der Prozessstabilität im Ver-
 gleich zum Fokusdurchmesser von 330 µm.

Abbildung 6 zeigt die geometrische Nahtausprägung hinsichtlich Einschweißtiefe und Anbin-
 dungsbreite bei einem Fokusdurchmesser von 820 µm.

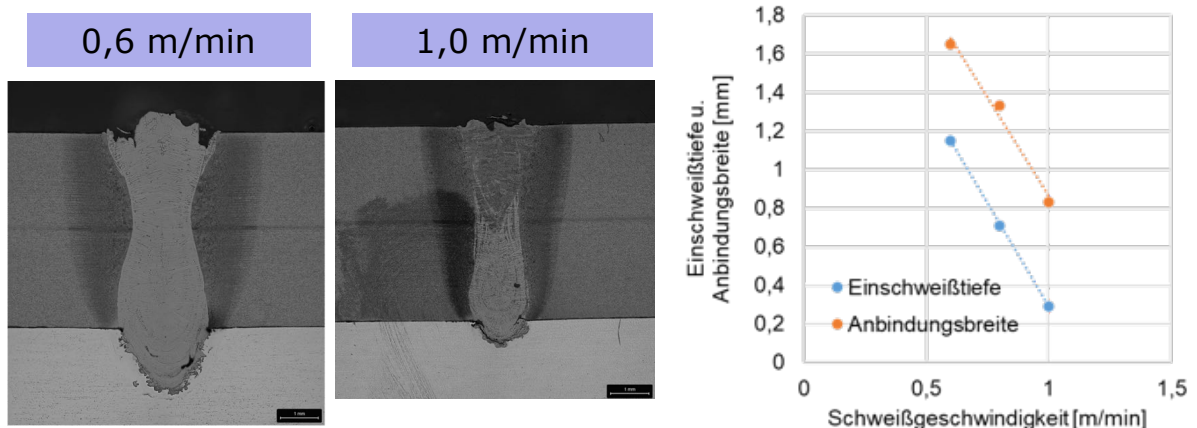


Abbildung 6: Nahtausprägung, Einschweißtiefe & Anbindungsbreite bei Fokusdurchmesser 820 µm

Bei zunehmender Schweißgeschwindigkeit nehmen Einschweißtiefe und Anbindungsbreite ebenfalls ab. Gleichzeitig ergibt sich eine weitere Verbesserung der Prozessstabilität im Vergleich zu den kleineren Fokaldurchmessern.

Für die Auswahl der geeigneten Fokaldurchmesser erfolgt eine vergleichende Betrachtung der Fokaldurchmesser bei gleicher Schweißgeschwindigkeit. Die resultierende Nahtausprägung, Einschweißtiefe und Anbindungsbreite bei einer Schweißgeschwindigkeit von 0,8 m/min zeigt Abbildung 7.

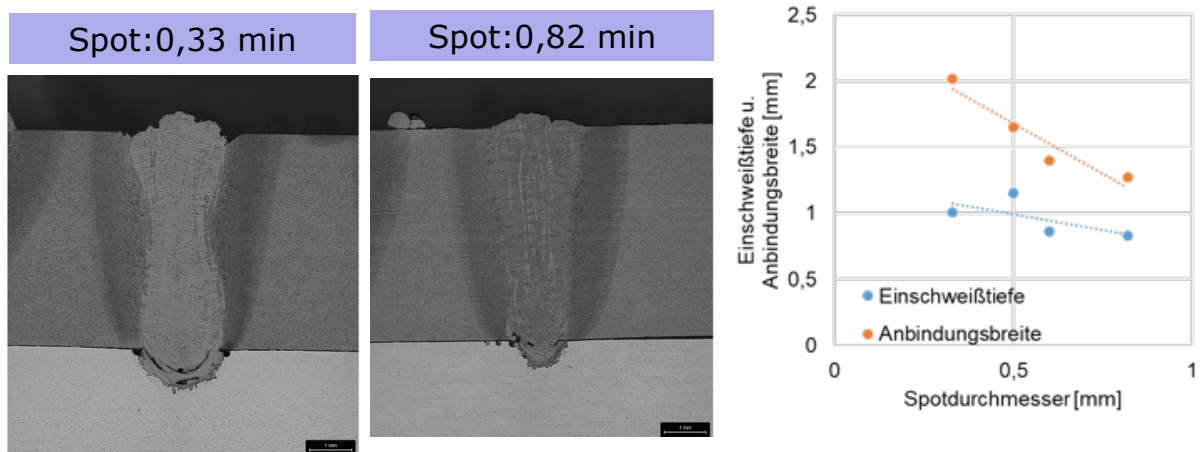


Abbildung 7: Nahtausprägung, Einschweißtiefe & Anbindungsbreite bei Vorschub 0,8 m/min

Bei einer Vergrößerung des Fokaldurchmessers nimmt die Einschweißtiefe ab, da die Nahtbreite zunimmt und bei konstanter Streckenenergie die Nahtquerschnittsfläche gleichbleibt. Da sich die Verbindungszone aus Stahl und Aluminium im Bereich der Nahtwurzel befindet, nimmt auch die Anbindungsbreite ab. Das gilt analog für den Vergleich bei einer Schweißgeschwindigkeit von 0,6 m/min (Abbildung 8).

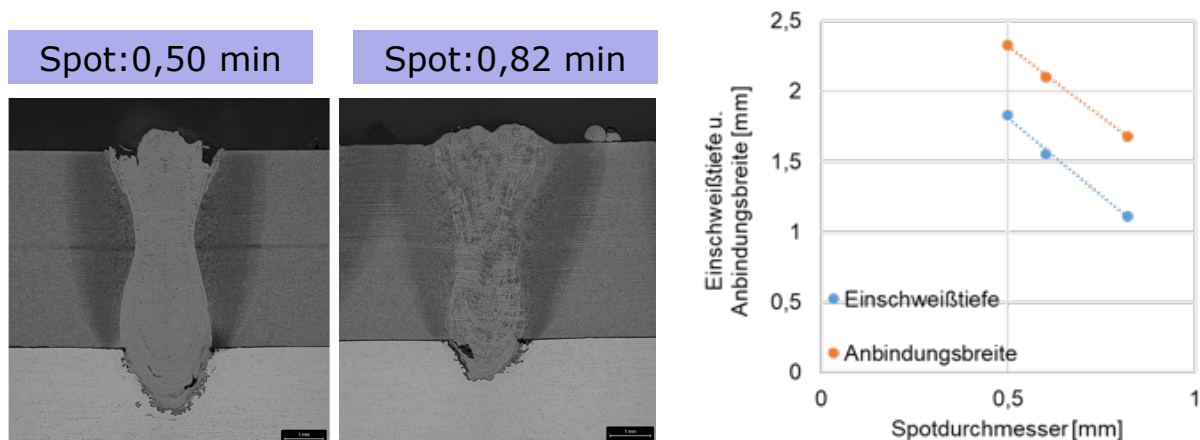


Abbildung 8: Nahtausprägung, Einschweißtiefe & Anbindungsbreite bei Vorschub 0,6 m/min

Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

1. Geringe Spotdurchmesser mit hoher Divergenz sind wegen geringer Prozessstabilität nicht geeignet für den inneren Spotdurchmesser. Hier wäre eine höhere Strahlqualität oder ein Spot-in-Spot-Modul erforderlich.
2. Der Spotdurchmesser von 820 μm ist geeignet für den äußeren.

Im nächsten Schritt erfolgte die Untersuchung zum Schweißen mit zwei identischen Diodenlaserstrahlen in X-Anordnung. Ziel war die Ermittlung adäquater Parameter für das X-förmige Laserstrahlschweißen der St-Al-Verbindungen mit Erzeugung eines Hinterschnitts. Dafür kamen folgende Parameter zum Einsatz:

konstante Werkstückparameter

- Nahtform: X-Naht am Überlappstoß
- Nutbreite: 1,6 mm
- Oberblech: S355, 5 mm
- Nuttiefe: 3,0 mm
- Unterblech: Al 6082, 10 mm
- Nutwinkel: 15°
- Zusatzwerkstoff: Rein-Eisen-Pulver

konstante Laserparameter

- Laserleistung: 2 x 4 kW
- Faserdurchmesser: 600 μm
- Wellenlängen: 900, 940, 980, 1030 nm
- Fokusbereich: 1000 μm
- ohne Prozessgas

variable Parameter

- Abstand zwischen den Nuten / Versatz des Schnittpunkts -5 bis 5 mm
- Geschwindigkeit: 0,3 bis 0,8 m/min
- Fokuslage:

Die Probenvorbereitung mit Lage und Abstand der Nuten zeigt Abbildung 9.

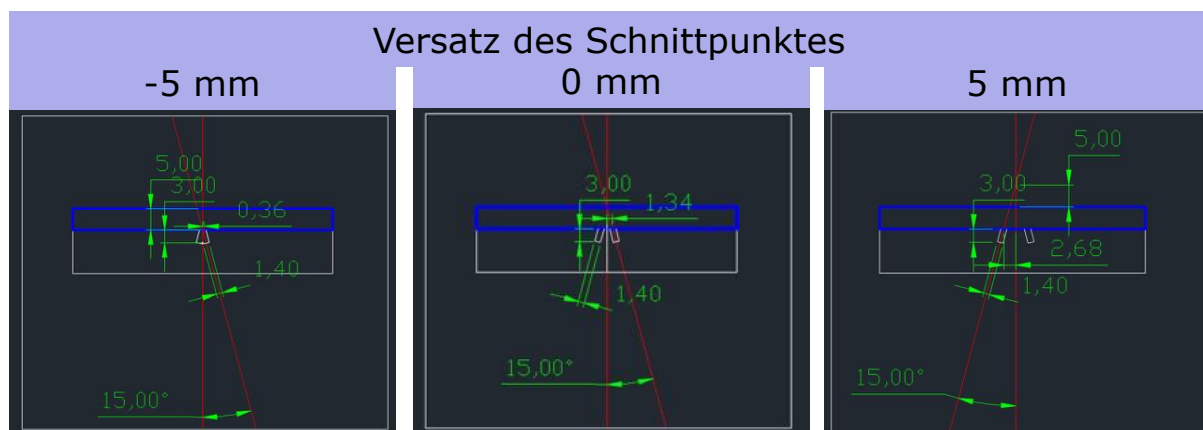


Abbildung 9: Probenvorbereitung; Lage und Abstand der Nuten

Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 10 dargestellt.

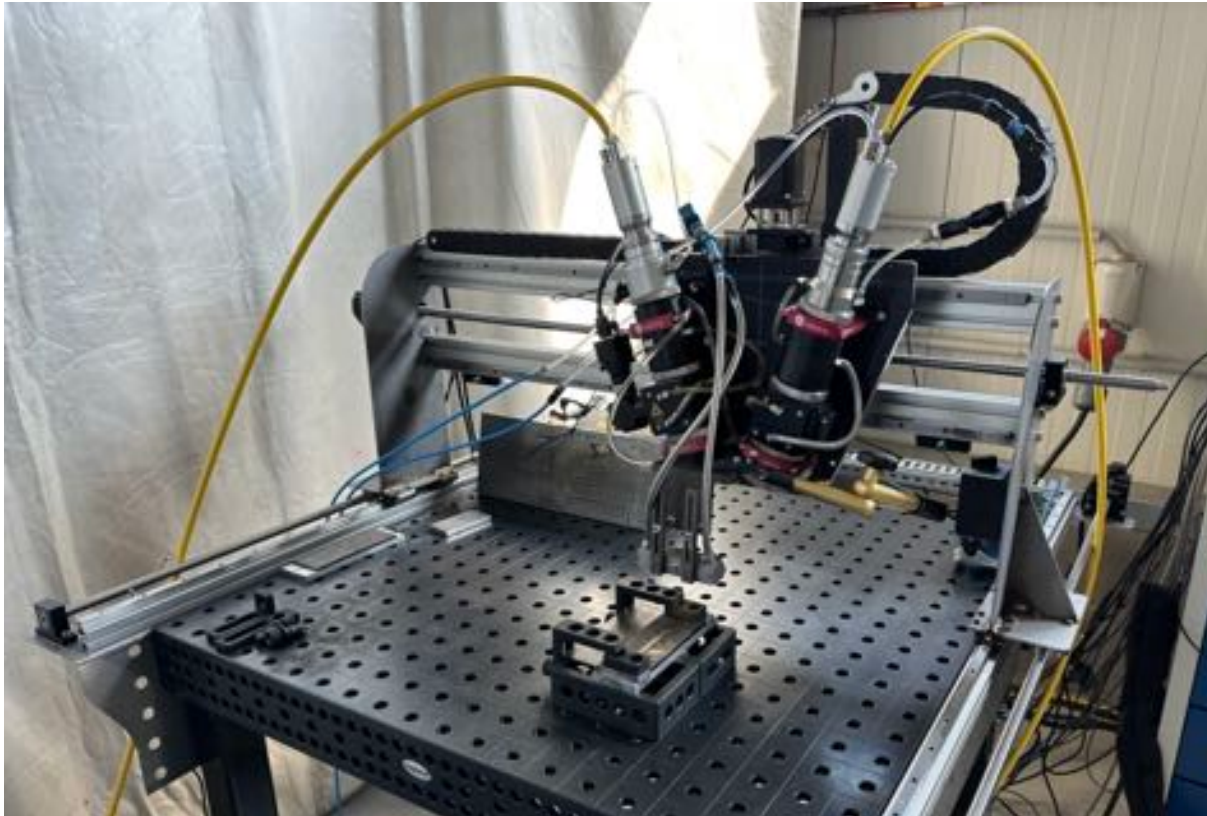


Abbildung 10: Versuchsaufbau mit 2x 4kW Diodenlaser in X-Anordnung

Der Schweißprozess zeichnete sich dadurch aus, dass beide Laser in einem Schmelzbad wirkten. Beim Aufschmelzen von Aluminium konnte eine deutliche Zunahme von Spritzern beobachtet werden, die jedoch trotz der Gesamtleistung von 8 kW beherrschbar war. Die resultierende Nahtoberfläche ist in Abbildung 11 vergleichend gegenübergestellt. Darin ist die Zunahme der Oberflächenrauheit beim Aufschmelzen des Aluminiums deutlich zu erkennen (beide Zeilen jeweils Mitte und rechts).

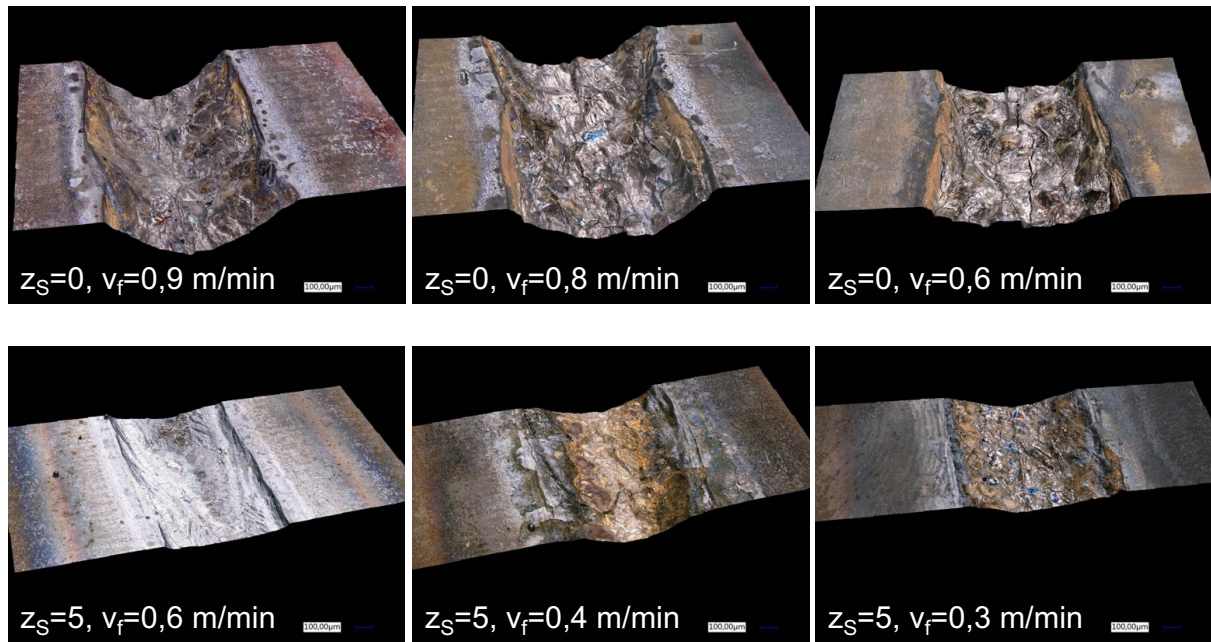


Abbildung 11: Resultierende Nahtoberfläche in Abhängigkeit von Vorschub und Strahl-Schnittpunkt

Bei **Lage** des Laserstrahl-Schnittpunkts auf der Oberfläche ($z_s = 0$) wird der Steg zwischen den Nuten im Unterblech bei Erreichen der gewünschten Einschweißtiefe komplett aufgeschmolzen. Bei Schnittpunkt $z_s = +5$ mm bleibt der Steg zwischen den Nuten bei Erreichen der gewünschten Einschweißtiefe weitgehend erhalten (Abbildung 12).

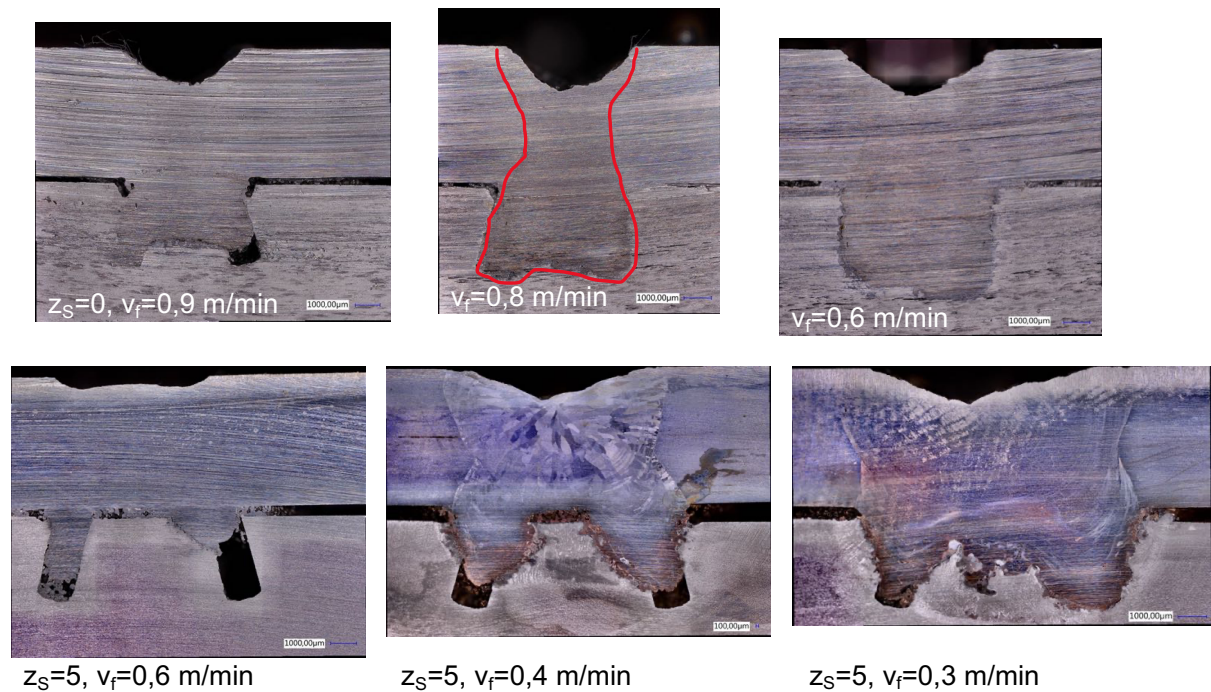


Abbildung 12: Resultierende Nahtquerschnitte in Abhängigkeit von Vorschub und Strahl-Schnittpunkt

Folgende Bestparameter konnten für 2 x 4 kW Diodenlaser und Fokusdurchmesser 1,0 mm ermittelt werden:

- $v_f = 0,8$ m/min für $z_s = 0$ mm
- $v_f = 0,3 - 0,4$ m/min für $z_s = +5$ mm

Die vorgestellten Ergebnisse sowie die Untersuchungen des LZH haben gezeigt, dass ein deutlich kleinerer Kerndurchmesser zum Erreichen der gewünschten Nahtausprägung erforderlich ist. Dieser ist mit Diodenlasern in der benötigten Leistung (2 x 6 – 8 kW) nicht realisierbar. Aus diesem Grund war die Weiterentwicklung einer separaten Optik bei LOD nicht mehr zielführend.

II.1.1.2 Demonstration von Verfahren und Prozesstechnik

Gemeinsam mit dem Konsortium wurde daher beschlossen, dass zur Demonstration die am LZH vorhandene geeignete Lasertechnik in Verbindung mit mobiler Anlagentechnik von LOD zum Einsatz kommen sollte. Es wurde von LOD eine mobile CNC-Anlage konzipiert und aufgebaut, welche leicht an neue Einsatzorte (z.B. zu den Werften) transportiert und dort auch temporär betrieben werden kann.



Abbildung 13: Mobiles und modulares CNC-Achs-System mit 3,8 m Verfahrensweg (verlängerbar)

Das von LOD im Projekt entwickelte mobile und modulare Anlagensystem weist folgende Kernelemente auf:

- Grundrahmen aus Aluminium-Traversen-Elementen (leicht, robust & stabil, skalierbar)
- Linearachsen mit IGUS-Profilführungen (verlängerbar)
- Motoren mit Zahnriemenantrieb (gut skalierbar)
- 3-Achs-CNC-Steuerung von Beckhoff (zuverlässiger Industriestandard)

Das mobile Achssystem lässt sich in Module von max. 2 m Länge zerlegen, die von Hand mit zwei Personen getragen und montiert werden können. Das Basis-System ohne Laserschweißköpfe ist in Abbildung 13 gezeigt.

Zum Aufbau der mobilen Demonstrationsanlage wurden folgende Komponenten ergänzt (Abbildung 14):

- 2 x Scansonic-Optiken mit Wobblescanner und justierbarem Kollimator
- 2 x 6 kW Coherent Faserlaser mit Adaptive Ring Mode (ARM)
- Justierbare Aufnahme des LZH zur Querverstellung der Laserfoki
- Crossjets + Rauchabsaugung
- Hydraulische Spannvorrichtung mit 8 Spannzylindern (alle 500 mm in Längsrichtung)

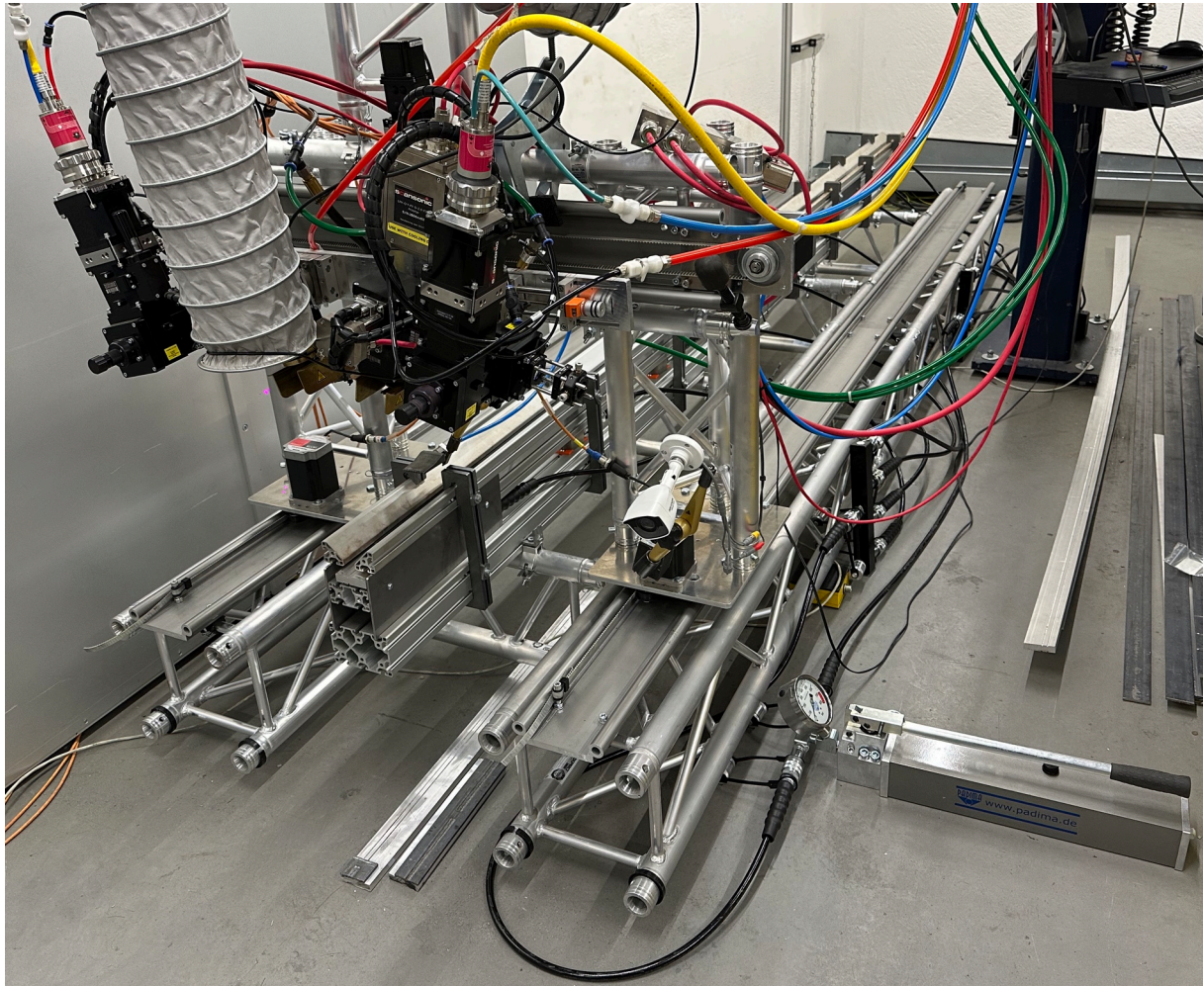


Abbildung 14: Mobile Demonstrationsanlage mit 3,8 m Verfahrweg

Zur finalen Projekt-Demonstration wurden Stahl-Aluminium-Verbinder als Halbzeuge mit 3,5 m Länge geschweißt. Anordnung und Querschnitt sind in Abbildung 15 dargestellt. Der Nutwinkel von 15° und die Nuttiefe von 3 mm wurden beibehalten.

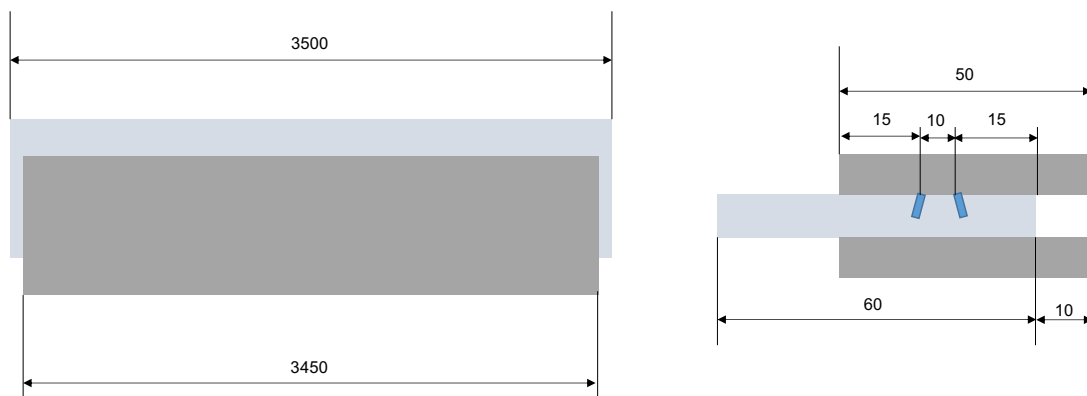


Abbildung 15: Geometrie des finalen Stahl-Aluminium-Adapters als Halbzeug

Zum Schweißen der 3,5 m langen Stahl-Aluminium-Halbzeuge im Rahmen der Abschlussdemonstration kamen folgende Parameter zum Einsatz:

- Laserleistung: 2 x 6 kW (je 2 kW Kern, 4 kW Ring)
- Faserdurchmesser: 70 µm Kern, 180 µm Ring
- Abbildungsverhältnis der Optik: $M = 2,9$
- Fokusbereich: 203 µm Kern, 523 µm Ring
- Wobble-Breite: 2,5 mm
- Vorschubgeschwindigkeit: 875 mm/min
- Fokusbereich: $z = 0$ mm (auf dem Oberblech)
- Nutabstand: 8 mm (ein Schmelzbad) vs. 10 mm (zwei Schmelzbäder)

Aufgrund der hohen Laserleistungen erfolgte das Schweißen in einer komplett geschlossenen Kabine mit Fernbedienung und Prozessbeobachtung von außen (Abbildung 16).

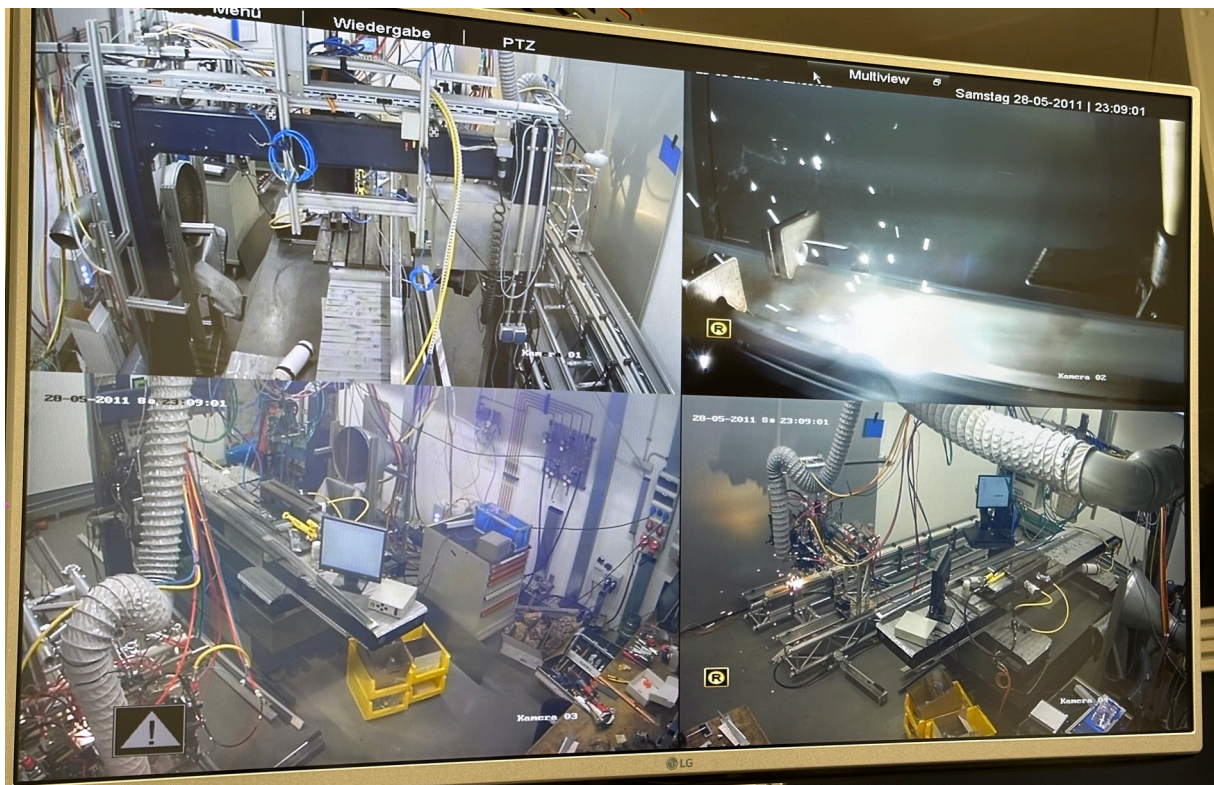


Abbildung 16: Kamerabeobachtung während des Schweißprozesses

Kabine und Werkstück unmittelbar nach dem Schweißen sind in Abbildung 17 gezeigt.

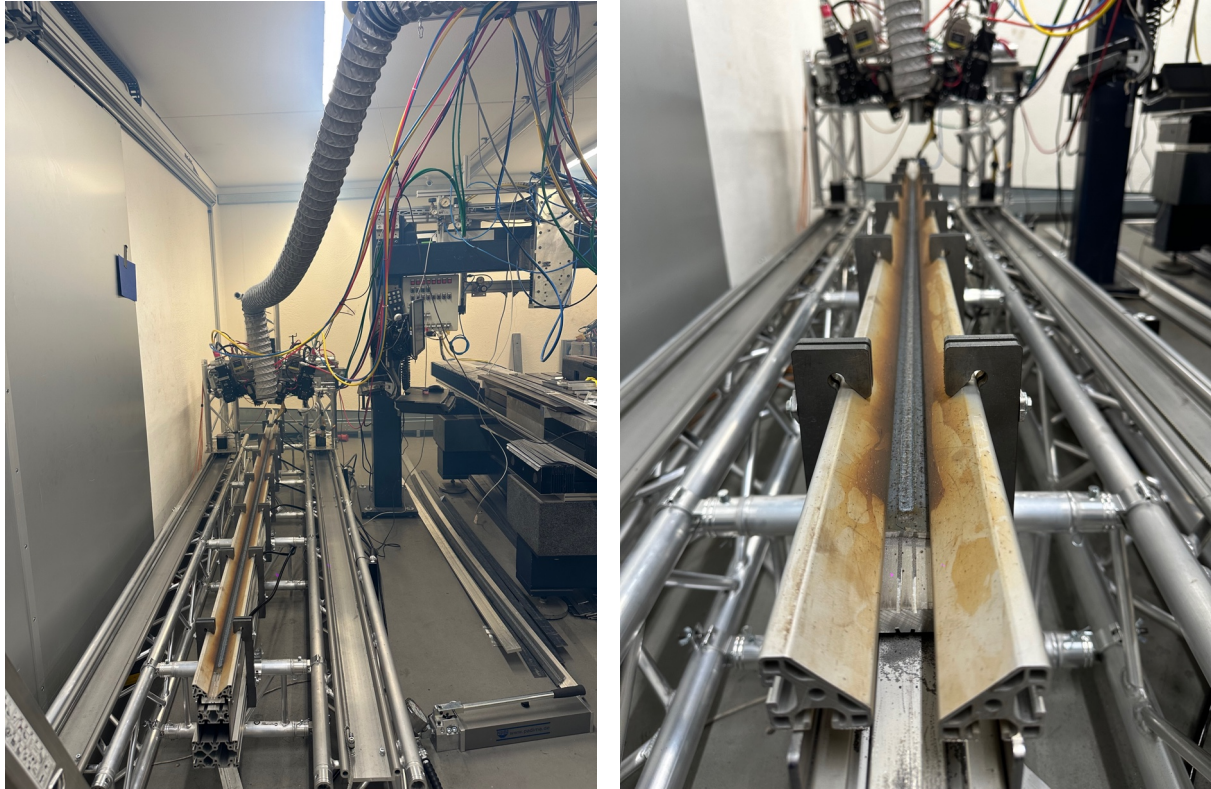


Abbildung 17: Kabine und Werkstück nach dem Schweißen

Das Schweißen der 3,5 m langen Halbzeuge erfolgte beidseitig nacheinander, wobei das Profil nach dem Schweißen der ersten Seite gewendet worden ist. Es kamen zwei Nutabstände zum Einsatz: Bei 8 mm Nutabstand wirken im Prozess beide Laserstrahlen in einem gemeinsamen Schmelzbad, während bei 10 mm Nutabstand zwei getrennte Schmelzbäder entstehen (Abbildung 18). Ersteres wirkt auf den Gesamtprozess stabilisierend und verbessert das Ausgabenergebnis. Bei zwei getrennten Schmelzbädern wirkt sich die Verteilung der Nähte über eine größere Breite ggf. vorteilhaft auf die Steifigkeit aus.

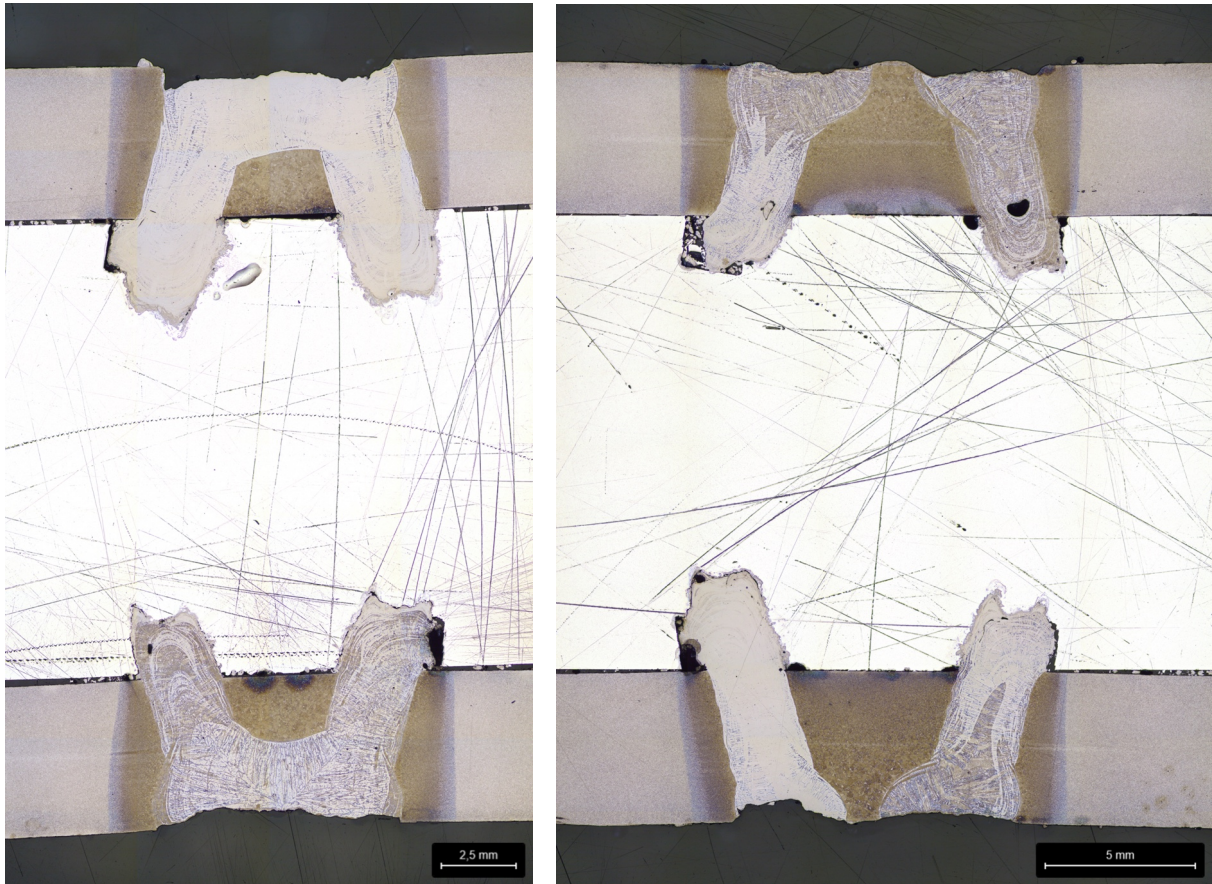


Abbildung 18: Querschliffe der Demonstrator-Halbzeuge; Nutabstand 8 mm (li.) bzw. 10 mm (re.)

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass das Schweißverfahren zum Erzeugen langer Stahl-Aluminium-Halbzeuge für den Schiffbau erfolgreich demonstriert und angewendet wurde. Das Demonstrations-System ist modular an zukünftige Adaptergeometrien anpassbar und lässt sich nahezu beliebig verlängern – eine Modifizierung der Steuerung ist dazu nicht erforderlich. Das Projektziel wurde erreicht.

II.2 wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Eine Übersicht über die Gesamtkosten des Teilvorhabens zeigt Tabelle 2:

Material und Verbrauch	34.710,49 €
Personal	193.372,34 €
Reisekosten	676,72 €
vorhabensspezifische Abschreibungen	17.464,02 €
Sonstige	0 €
Summe	246.223,57 €
Zuwendung	148.135,69 €
Förderquote	60 %

Tabelle 1: Finanzielle Übersicht gem. Verwendungsnachweis

II.2.1 Materialkosten

Im Zuge der Konstruktion kam als Hilfswerkzeug der 3D-Druck (Fused Deposition Modeling – FDM) zum Einsatz, um schnell die Passgenauigkeit von Komponenten prüfen zu können. Erst nach der erforderlichen Anzahl an Iterationsschleifen wurden die finalen Komponenten aus Metall gefertigt (Laserschneiden und Fräsen). Daher wurde als Verbrauchsmaterial Kunststoff-Filament für den 3D-Druck, Halbzeuge für den Bau von Komponenten für Optik und Spannvorrichtungen sowie Fräswerkzeuge benötigt. Darüber hinaus wurden Optikkomponenten (Schutzgläser, Linsen, Spiegel) sowie entsprechende Aufnahmen, Justiereinrichtungen verbaut. Für die Durchführung der Schweißversuche sowie die Herstellung der Demonstrationsbauteile wurde Schutzgas eingesetzt (Argon, Stickstoff) und geeignete Spannvorrichtungen aus Halbzeugen und industriellen Spanntechnik-Komponenten aufgebaut.

II.2.2 Personalkosten

Der Projektleiter sowie der Prozessentwickler (beide Ingenieure) trugen die Verantwortung für die erfolgreiche Abwicklung des Forschungsvorhabens. Der Aufgabenbereich erstreckte sich von der Versuchsplanung und -durchführung bis zur Prüfung und Auswertung der erzeugten Proben sowie der anschließenden Ergebnisinterpretation und -dokumentation. Darüber hinaus kam ein weiterer Ingenieur für die Konstruktion

des Optikaufbaus und der Spanntechnik zum Einsatz sowie einer für die Durchführung der Schweißversuche. Zur gesicherten Durchführung der Arbeitspunkte ist seitens der Mitarbeiter ein fundiertes Wissen auf dem Gebiet der Lasermaterialbearbeitung sowie der Metallurgie erforderlich. Der Techniker leistet den Ingenieuren technische Unterstützung bei Versuchsaufbauten und der Anlagenbedienung.

II.2.3 Reisekosten

Die in diesem Teilprojekt entstehenden Reisekosten ergeben sich aus den Teilnahmen an den Projekttreffen mit wechselnden Austragungsorten bei den unterschiedlichen Projektpartnern und bilateralen Abstimmungen vor Ort bei einzelnen Partnern. Aufgrund der räumlichen Nähe zum LZH konnten die Reisekosten sehr gering gehalten werden.

II.2.4 Vorhabensspezifische Abschreibungen

Für die metallografische Auswertung ist die Beschaffung eines Mikrohärtemessgerätes erfolgt, mit dem die Härtewerte im Schweißgut, der Wärmeeinflusszone und dem Grundwerkstoff bestimmt werden kann. Darüber hinaus geben sehr hohe Härtewerte im Schweißgut Aufschluss über das Auftreten von intermetallischen Phasen.

II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

In diesem Projekt wurde ein Verfahren zum Schweißen von dickwandigen Stahl-Aluminium-Mischverbindungen entwickelt. Entsprechend mussten Personal- und Anlagenkapazitäten bereitgestellt werden. Ein wirtschaftliches Risiko bestand darin, dass das Vorhaben weit über den aktuellen Stand der Wissenschaft und Technik hinausgeht und erhebliche Aufwendungen erfordert, denen zum Entwicklungszeitpunkt kein gesicherter Ertrag gegenübersteht. Für LOD ergab sich durch die Teilnahme an diesem Projekt und den Umfang der anstehenden Arbeitspakete eine finanzielle Belastung, die allein aus dem bestehenden Geschäftsbetrieb ohne eine öffentliche Förderung nicht tragbar gewesen wäre. Eine Teilnahme an diesem Projekt ohne öffentliche Förderung war nicht möglich.

II.4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Das entwickelte Stahl-Aluminium-Schweißverfahren geht deutlich über den bisherigen Stand der Technik hinaus und lässt sich in allen Bereichen einsetzen, wo Stahl-Aluminium-Mischverbindungen im Überlappstoß zu fügen sind. Neben den Werften als Hauptanwendungsbranche ist dies auch in der Fassadentechnik sowie im Maschinen- und Anlagenbau von Interesse. Darüber hinaus bietet die von LOD entwickelte und realisierte mobile Anlagentechnik dank des modularen Konzepts sehr gute Anwendungsmöglichkeiten für alle mobilen Anwendungen in der Laserbearbeitung – sei es zum Schneiden, Schweißen oder der Oberflächenbearbeitung. Für LOD ergibt sich gerade für das Geschäftsfeld der mobilen Lasereinsätze daher eine sehr gute Perspektive, diese Technologie zukünftig in neuen Anwendungsbereichen einzusetzen.

II.5 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Arbeiten anderer Stellen zum vorliegenden Themengebiet sind nicht bekannt.

II.6 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

Ergebnisse des Teilprojekts wurden von LOD bislang ausschließlich auf der Messe „Schweißen und Schneiden 2024“ präsentiert.

Zukünftig ist geplant, sowohl das Stahl-Aluminium-Schweißverfahren als auch die mobile Anlagentechnik auf Messen, der Homepage und Konferenzen wie dem LAF – Laser-Anwenderforum in Bremen vorzustellen und zu bewerben.

III KURZFASSUNG – BERICHTSBLATT

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht	
3. Titel Überführung des formschlüssigen Laserstrahlschweißens auf hochskalierten Halbzeugen aus Stahl und Aluminium in werftnaher Umgebung		
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Meier, Oliver	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.12.2024	6. Veröffentlichungsdatum 19.07.2025
	7. Form der Publikation	
	8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) LASER on demand GmbH Lise-Meitner-Str. 9 31303 Burgdorf	
9. Ber. Nr. Durchführende Institution		10. Förderkennzeichen 03SX547D
11. Seitenzahl 33		12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 53170 Bonn
13. Literaturangaben		14. Tabellen
15. Abbildungen 18		16. Zusätzliche Angaben
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)		
18. Kurzfassung Im Rahmen des gesamten Forschungsvorhabens erfolgte die Weiterentwicklung des lasergestützten Schweißverfahrens zum Fügen von dickwandigen Mischverbindungen aus Stahl und Aluminium durch Umsetzung eines neuartigen Ansatzes zur Erzeugung von Hinterschneidungsgeometrien im Fügequerschnitt mittels zweier schräg verlaufenden Laserstrahlen. Dieser Effekt ist mit der Wirkung eines Stanzniets vergleichbar, welcher ein bewährtes mechanisches Fügeverfahren darstellt. Der Vorteil des geplanten Laserschweißkonzepts ist jedoch die linien- statt punktförmige Fügeverbindung mit deutlich erhöhten Traglasten. Das Kernziel des vorliegenden Teilprojekts von LOD lag in der Übertragung der neuen Schweißmethode auf praxisrelevante Einsatzfälle in Form von langen Halbzeugen aus Stahl und Aluminium mit anforderungsgerechten Eigenschaften. Basierend auf den Erfahrungen von LOD bei der Laserbearbeitung von Großbauteilen wurde schon während der Entwicklungsphase der Fokus auf das Erreichen eines robusten Prozesses mit reproduzierbar hoher Qualität gelegt. Parallel zur Prozessentwicklung unter Laborbedingungen am LZH erfolgte diese in den Fertigungshallen von LOD unter werftnaher Umgebung. Zuvor wurde der auf Grundlage der gewonnenen Erkenntnisse aus den grundlegenden Untersuchungen von LOD und LZH ein regelungsfähiger Schweißkopf entwickelt. Die Schweißversuche erfolgten nach der Integration des Schweißkopfes mittels umfangreicher Untersuchungen zur Herstellung von langen, anforderungsgerechten Halbzeugen. Ziel war es, der maritimen Industrie ein praxistaugliches Verfahren bereit zu stellen, mit dem derartige Halbzeuge effizient, prozesssicher und kostengünstig gefertigt können.		
19. Schlagwörter Laserschweißen, Stahl, Aluminium, Mischverbindungen, Schiffbau, mobile Lasereinsätze		
20. Verlag	21. Preis	

IV DOCUMENT CONTROL SHEET

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication) report	
3. title Transfer of form-fitting laser beam welding to highly scaled semi-finished products made of steel and aluminum in a shipyard environment		
4. author(s) (family name, first name(s)) Meier, Oliver		5. end of project 31.12.2024
		6. publication date 19.07.2025
		7. form of publication
8. performing organization(s) (name, address) LASER on demand GmbH Lise-Meitner-Str. 9 31303 Burgdorf Germany		9. originator's report no.
		10. reference no. 03SX547D
		11. no. of pages 33
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 53170 Bonn		13. no. of references
		14. no. of tables
		15. no. of figures 18
16. supplementary notes		
17. presented at (title, place, date)		
18. abstract As part of the overall research project, the laser-assisted welding process for joining thick-walled mixed steel and aluminum joints was further developed by implementing a novel approach for creating undercut geometries in the joining cross-section using two obliquely directed laser beams. This effect is comparable to that of a self-piercing rivet, which is a proven mechanical joining process. The advantage of the planned laser welding concept, however, is the linear rather than point-like joining connection with significantly increased load-bearing capacities. The core objective of this LOD subproject was to transfer the new welding method to practical applications in the form of long semi-finished products made of steel and aluminum with properties that meet the requirements. Based on LOD's experience in laser processing large components, the focus during the development phase was already on achieving a robust process with reproducibly high quality. Parallel to the process development under laboratory conditions at the LZH, this took place in LOD's production halls in a shipyard-like environment. Previously, a controllable welding head was developed based on the findings from the basic investigations of LOD and LZH. After the integration of the welding head, the welding tests were conducted using extensive studies on the production of long, requirement-compliant semi-finished products. The goal was to provide the maritime industry with a practical process with which such semi-finished products could be manufactured efficiently, reliably, and cost-effectively.		
19. keywords Laser welding, steel, aluminum, mixed joints, shipbuilding, mobile laser applications		
20. publisher		21. price

V DANKSAGUNG

„Gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages“ und „Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor“

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Die Autoren des Schlussberichts danken dem Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) für die Förderung des Verbundvorhabens „FOLAMI“, der Forschungszentrum Jülich GmbH (PtJ) für die gute administrative Unterstützung und den Verbundpartnern für die gute Zusammenarbeit.