

**Schlussbericht zum Projekt innerhalb der Bekanntmachung „WIR! – Wandel durch Innovation in der Region“ des Bundesministeriums für Bildung und Forschung**

**„WIR! – LASER.region.AACHEN – Kombinierte Laserverfahren in der industriellen Fertigung; TP4: Schweißverfahren bei L-PBF-Bauteilen“**

**Akronym: KoLa**

**Förderkennzeichen: 03WIR4604D**

<b>Verbundkoordinator</b>	Prof. Dr.-Ing. Sebastian Bremen FH Aachen University of Applied Sciences Bayernallee 11, 52066 Aachen
<b>Partner</b>	FH Aachen (FHAC) Fraunhofer Institut für Lasertechnik – ILT (ILT) Aconity GmbH (ACO) Clean-Lasersysteme GmbH (CL) ProCom Automation GmbH (ProCom) LaVa-X GmbH (LaVa-X)
<b>Laufzeit</b>	24 Monate
<b>Laufzeitbeginn</b>	01.01.2023
<b>Projektende</b>	31.12.2024
<b>Verbundpartner</b>	Dr.-Ing. Benjamin Gerhards LaVa-X GmbH Kaiserstraße 100, 52134 Herzogenrath

Gefördert durch:

## Inhalt

<b>1</b>	<b>Stand der Technik</b> .....	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Prozesslandkarte</b> .....	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>Technischer Handlungsstrang</b> .....	<b>5</b>
3.1	Schnittstelle Schweißen von LPBF-Bauteilen.....	6
3.2	3d-Bahnplanung .....	14
3.3	Anwendungserprobung der untersuchten Prozesskette anhand des Demonstrators 19	
<b>4</b>	<b>Quellenverzeichnis</b> .....	<b>21</b>

---

# 1 Stand der Technik

Die einzelnen laserbasierten Produktionsprozesse, welche derzeit in der Industrie Anwendung finden, haben durch vorangegangene Forschungsarbeiten und gemeinsamer Entwicklungen von Forschungspartnern und Unternehmen Marktreife erlangt. Auch kommt es vor, dass sie in verschiedenen Prozessketten sequentiell kombiniert werden. Eine ausführliche und systematische Betrachtung der Schnittstellen verschiedener laserbasierter Fertigungstechniken fehlt jedoch. Zwar gibt es erste Ansätze im Bereich der Prototypenentwicklung, diese sind aber eher als Konzept-Studien zu verstehen, und geben keinen Einblick in kritische Schnittstellenbereiche.



Abbildung 1: Konzeptstudien EOS 3i-PRINT und Light Rider von APWorks bestehen aus geschweißten LPBF-Bauteilen [1, 2]

Die in Abbildung 1 gezeigten Konzepte wurden nur einmalig oder in stark limitierter Stückzahl gefertigt. Sie illustrieren eindrucksvoll, welche Möglichkeiten kombinierte Prozessketten bieten können. Exemplarisch sind hier Bauteile gezeigt, welche das Laser Powder Bed Fusion (LPBF)-Verfahren und anschließende Schweißprozesse kombinieren. Einige Veröffentlichungen bestätigen den Bedarf für solche intelligenten Fügetechniken von additiv gefertigten Bauteilen und somit auch von kombinierten Laserverfahren. [3, 4]

Dabei haben gemeinsame Untersuchungen von FH Aachen und LaVa-X gezeigt, dass das Verschweißen von LPBF-gefertigten Aluminium-Werkstoffen mit Aluminium-Halbzeugen mit sehr hohen Schweißnahtqualitäten möglich ist. Bei der Verbindung zweier LPBF-gefertigter Aluminium-Werkstücke treten allerdings immer noch vergleichsweise große Poren auf. [5]

Ein weiteres bestehendes Beispiel für kombinierte Verfahren, sind Laserbearbeitungsköpfe, welche bereits am Markt verfügbar sind. Sie ermöglichen sowohl Laserschweißen als auch Laserschneiden aus einem Bearbeitungskopf. [6, 7]

Weitere sequenzielle Verfahrenskombinationen finden sich im Laserpolieren von SLE-gefertigten Glasbauteilen, sowie dem Laserpolieren von metallischen LPBF-Bauteilen und SLS-Bauteilen aus Kunststoff. [8, 9, 10]

Das Reinigen und anschließende Schweißen mittels laserbasierter Verfahren findet ebenfalls Anwendung und zeigt vielversprechende Ergebnisse. So können nicht nur

---

Gefördert durch:

---

Öle und Fette aus den vorherigen Schritten ressourceneffizient entfernt, sondern auch die Schweißqualität erhöht und Spritzer vermieden werden. [11]

Ein weiterer Anwendungsfall ist bspw. das Zusammenspiel von Laserreinigung und Laserschweißen im Fall von Kupfer- oder Aluminiumlackdraht, der in Elektromotoren mit Hairpin-Technologie eingesetzt wird. Das Laserreinigen entfernt dabei die organische Beschichtung, die beim Schweißen verdampfen und somit zu großen Schweißgutauswürfen führen würde. Der LaVa-Prozess reduziert darüber hinaus die zum Schweißen benötigte Energie und reduziert prozessbedingte Poren. [12]

Es zeigt sich, dass bereits Arbeiten zur sequenziellen Kombination zweier Laserverfahren existieren. Eine ganzheitliche Untersuchung der Kombinationsmöglichkeiten mehrerer Lasermaterialbearbeitungsverfahren gibt es jedoch nicht. Ebenso sind bisher kaum Untersuchungen der technologischen Schnittstellenproblematiken durchgeführt worden, um Hindernisse solcher Verfahrenskombinationen gezielt abzubauen.

## 2 Prozesslandkarte

Im ersten Handlungsstrang wurde von dem Konsortium unter der Federführung von ProCom eine umfassende Erfassung der vorhandenen Prozesse und Verfahren in der Region durchgeführt. Dies ermöglichte die Identifikation von Schnittstellen und Potenzialen zur Vernetzung der verschiedenen Laserbearbeitungsverfahren und Produktionsprozesse.

Der erste Handlungsstrang konzentrierte sich dabei auf die Erfassung und Analyse der bestehenden Prozesse und Verfahren innerhalb der Laserregion. Dabei wurde eine detaillierte Prozesslandkarte erstellt, die einen umfassenden Überblick über die bestehenden Spezifikationen und Anforderungen bot. Sowohl digitale Schnittstellenproblematiken als auch potenzielle Verfahrenskombinationen konnten identifiziert werden. Diese Ergebnisse bildeten die Grundlage für eine zielgerichtete Vernetzung der Verfahren und die Entwicklung von Lösungsstrategien zur besseren Integration in bestehende Produktionsprozesse.

Innerhalb des Konsortiums wurde unter der Federführung von ProCom ein Fragebogen entwickelt, mit dem die Prozesse und Verfahren innerhalb der Laserregion Aachen erfasst werden können. Dieser ist nicht nur bezogen auf die Vergleichskriterien hinsichtlich des LaVa-Prozesses, sondern umfasst alle Laserbearbeitungsprozesse, die in der Region zu finden sind.

Zusätzlich wurde eine interne Benchmarkstudie durchgeführt, die sowohl interne Projekte als auch solche Forschungsprojekte beinhaltet, in denen LaVa-X im projektbegleitenden Ausschuss mitarbeitet. Also solche sind neben den Laserschweißprozessen auch das Oberflächenpolieren, Reinigen und das additive Fertigen mit dem Laserstrahl enthalten.

---

Aus den zusammengestellten Daten wurde federführend von ProCom eine Prozesslandkarte entwickelt, die sowohl die einzelnen, kombinierbaren Laserprozesse sowie die Firmen darstellt, die entsprechende Prozesse anbietet. Die Landkarte soll Kunden das sogenannte „One-Stop-Shopping“ ermöglichen, was die Attraktivität der Laserregion Aachen maßgeblich steigert.

Weiterhin wurde in Kooperation mit der FH Aachen, dem ILT sowie den weiteren Projektpartnern eine Marktstudie durchgeführt, die den Bedarf an Kombinationen verschiedener Laserprozesse beleuchtet.

Insbesondere sind hier die zeit- und kostenintensiven laserbasierten additiven Fertigungstechniken zu nennen, die durch Verwendung von Schweißprozessen als artreine oder hybride Bauteile gefertigt werden können. So lässt sich Bauraum und Zeit sparen, weiterhin können an verschiedenen Stellen ggf. Halbzeuge verwendet werden, um Fertigungszeiten und -kosten zu sparen. Im Weiteren können sich insbesondere an den Bauteilkanten, die später als Fügeflächen genutzt werden sollen, Verunreinigungen und Oxide sammeln, die die schweißtechnische Bearbeitbarkeit signifikant verringern. Daher ist die Verwendung eines Laserreinigungsprozesses ggf. unabdingbar.

Auf Basis dieser Überlegung wurden verschiedene Fertigungskombinationen erdacht, die auf konventionelle Bearbeitungsschritte wie zerspanen oder schleifen verzichten und eine rein laserbasierte Anwendung abzielen. Dabei ist das Szenario:

1. Bauteilfertigung mittels LPBF
2. Kantenvorbereitung durch Laserreinigung bzw. Laser-Umschmelzen
3. Fügen der Bauteile

Bei der Kombination stellen sich verschiedene Fragen, die in späteren Untersuchungen innerhalb des technischen Handlungsstrangs beantwortet werden müssen. Als solche zählen vor allem die Fertigungstoleranzen, die einen maßgeblichen Einfluss auf die Spalte haben, die sich an den Fügestellen zwischen den Bauteilen ergeben. Hier sind bspw. Verzüge zu nennen, die während der LPBF-Fertigung auftreten. Zusätzlich ist die Oberflächenbeschaffenheit der Stoßkanten von hoher Relevanz. Insbesondere letztere sollen durch die vorgenannten Oberflächenbehandlungen relativiert werden.

### **3 Technischer Handlungsstrang**

Der technische Handlungsstrang fokussierte sich bei LaVa-X auf die praxisnahe Erprobung von Prozessverkettungen sowie die Untersuchung technischer Schnittstellenproblematiken. Dadurch konnten konkrete Anwendungsfälle für kombinierte Laserverfahren entwickelt und erste technische Herausforderungen identifiziert sowie Lösungsansätze erarbeitet werden.

---

Ein zentraler Erfolgsfaktor war die enge, zielorientierte Zusammenarbeit der Verbundpartner, die sich entsprechend ihrer betrieblichen Kompetenzen in die Handlungsstränge einbrachten. Der kontinuierliche Austausch zwischen KMUs und Forschungseinrichtungen im Rahmen regelmäßiger Projektabstimmungen führte zu praxisnahen Lösungsstrategien und förderte das gegenseitige Verständnis für die Anforderungen der industriellen Anwendung.

Somit hat das Projekt maßgeblich dazu beigetragen, die Zusammenarbeit innerhalb der Region zu stärken und die Grundlage für eine erfolgreiche Umsetzungsphase zu schaffen. Durch die frühzeitige Vernetzung der Bündnispartner konnten Anlaufschwierigkeiten in künftigen Forschungsprojekten minimiert werden, was die Effektivität und Effizienz der weiteren Vorhaben deutlich steigert.

Insgesamt unterstützt das Projekt die förderpolitischen Ziele zur Stärkung der Innovationsfähigkeit und Wettbewerbsfähigkeit der Region, indem es neue Formen der Kooperation etabliert und die Nutzung kombinierter Laserverfahren als zukunftsweisende Technologie in der industriellen Fertigung vorantreibt.

Der Schwerpunkt lag auf der Entwicklung einer praxisnahen Applikation sowie der Analyse technologischer Schnittstellenproblematiken. Als vielversprechender Anwendungsfall wurde die Prozessverkettung des Laser Powder Bed Fusion (LPBF) mit einem nachgelagerten Laserschweißprozess untersucht. Ein besonderer Fokus lag auf der Entwicklung eines Bauteils aus dem Bereich des Karosserie- und Fahrzeugbaus: Eine Fahrrad-Hinterachsschwinge, die mittels LPBF gefertigt und anschließend mit konventionell hergestellten Rahmenteilern verschweißt wird, dient als Beispiel für die praktische Anwendbarkeit der Prozessverkettung. Hier zeigt sich, dass durch die Kombination von additiv gefertigten, hochfunktionalen Elementen mit konventionellen Halbzeugen großvolumige Bauteile kostengünstig und ressourcenschonend hergestellt werden können.

### **3.1 Schnittstelle Schweißen von LPBF-Bauteilen**

Das Schweißen von additiv gefertigten und mittels Laser gereinigten Bauteilen stellt eine große Herausforderung dar, welche in diesem Arbeitspaket bearbeitet werden soll. Die metallurgischen Hindernisse wie Bauteilverzug, starke Porosität in der Naht und geometrische Genauigkeit des mittels Schweißen gefügten Zielbauteils erfordern die sensible Einstellung der Schweißparameter. Genau hierbei bietet das Laserstrahlschweißen im Vakuum einige vorteilhafte Eigenschaften. Durch die im Vakuum reduzierte Verdampfungstemperatur sinkt auch die Temperatur des Schmelzbades, was unter anderem zu einer veränderten Schmelzbadströmung führt. Dadurch neigt der Schweißprozess zu weniger Poren und Spritzern und ermöglicht deutlich verzugsärmeres Schweißen.

Ein entscheidender Vorteil der additiven Fertigung liegt in der hohen Designfreiheit. Sie ermöglicht lastoptimierte Strukturen und die Integration funktionaler Innengeometrien. Allerdings bestehen weiterhin Einschränkungen hinsichtlich der Produktivität und Bauteilgröße, weshalb Fügetechnologien wie das Schweißen für komplexe und großvolumige Strukturen unverzichtbar sind. Dazu erfolgten bei LaVa-X umfangreiche Versuche zum Schweißen von LPBF-Bauteilen sowie die Erweiterung der LaVaCELL450 auf ein 5-Achs-CNC-System und die 3d-Bahnplanung.

Beim Schweißen von LPBF-Bauteilen – etwa aus dem Werkstoff 1.4404 – wurde zunächst auf Lichtbogenschweißverfahren wie WIG und MSG zurückgegriffen. Dabei zeigte sich zwar eine hohe Dichte ( $> 99,5\%$ ) der additiv gefertigten Bauteile, jedoch traten häufig kleinporige Strukturen ( $< 30\ \mu\text{m}$ ) an den Schmelzlinien auf, Abbildung 2. [13]

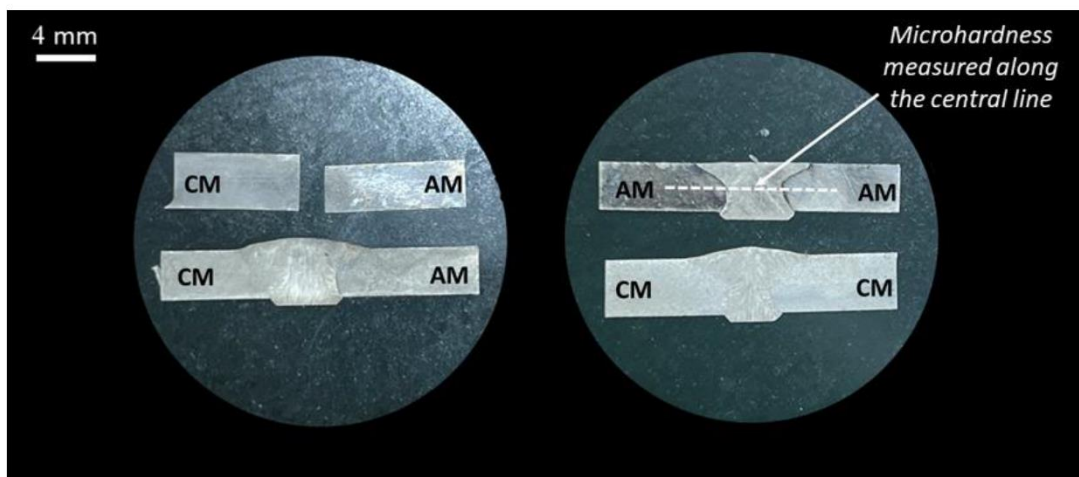


Abbildung 2: Beispielhafte MSG-Schweißung an LPBF-gefertigten Bauteilen [13]

Durch den Einsatz des Laserstrahlschweißens im Vakuum konnten diese Poren nahezu vollständig vermieden werden: So wurde beispielsweise bei einem 6 mm dicken LPBF-Bauteil aus 1.4404 eine vollständige Durchschweißung in nur einer Lage ohne nachweisbare Porosität erreicht, Abbildung 3.

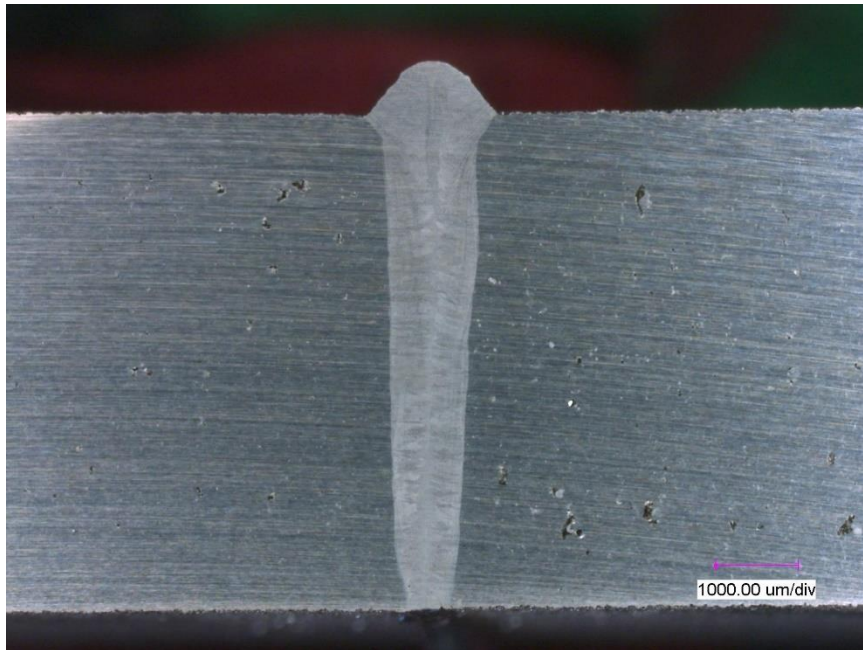


Abbildung 3: Beispielhafte LaVa-Schweißung an einem LPBF-gefertigten Bauteil

Ein typischer Herstellungsablauf für geschweißte LPBF-Bauteile umfasst bislang mehrere konventionelle Bearbeitungsschritte wie Fräsen, Lichtbogenschweißen und Schleifen, Abbildung 4.

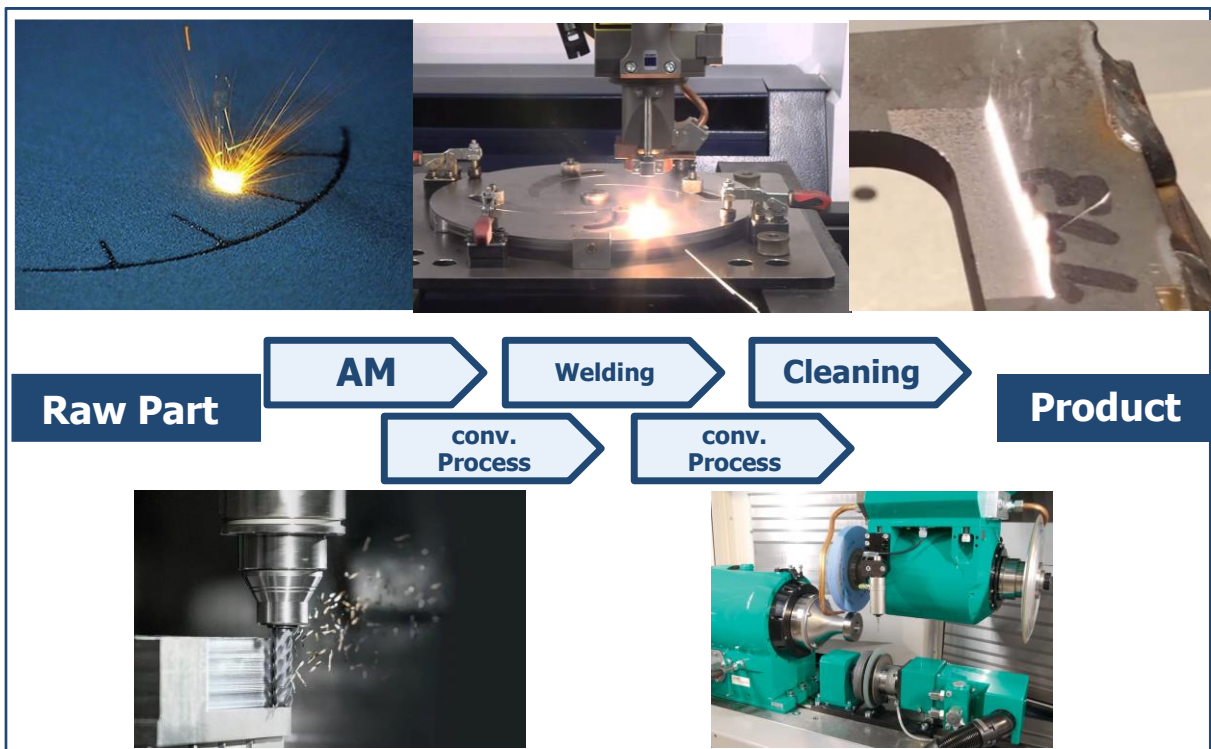


Abbildung 4: Prozesskette für die konventionelle Bearbeitung von (LPBF-gefertigten) Bauteilen

Ziel der untersuchten Prozesskette war es daher, diese konventionellen Schritte durch gezielte Laserreinigung und anschließendes Laserschweißen zu ersetzen und damit

Prozessschritte zu reduzieren Abbildung 5. Dabei treten jedoch technische Herausforderungen auf, etwa durch Eigenspannungen und Verzüge in LPBF-Bauteilen sowie durch Oberflächenverunreinigungen, die insbesondere bei „as built“-Oberflächen relevant sind.

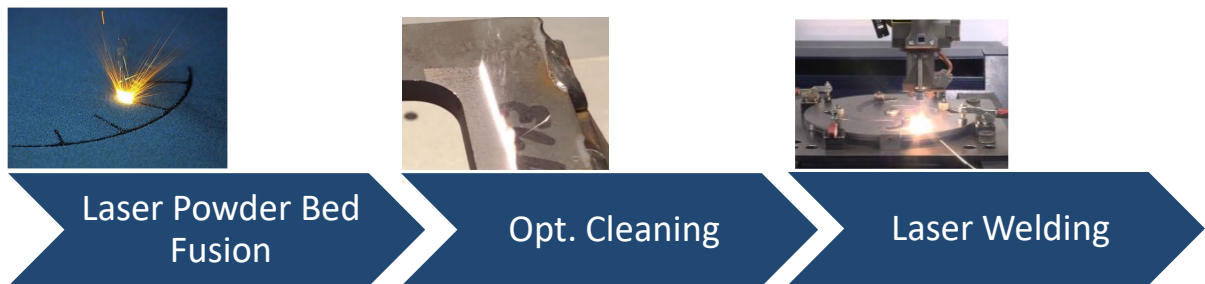


Abbildung 5: Innerhalb des KoLa-Projektes geplante Prozesskette

Die Versuchsreihen wurden auf der modular aufgebauten LaVaCELL450-Anlage durchgeführt, die mit einer Vakuumkammer eines Volumens von 90 l, X-Y und Z-CNC-Achsen, sowie flexibler Spanntechnik ausgestattet ist. Als Strahlquellen kamen u.a. ein SPI-Singlemode-Faserlaser mit 2 kW Leistung und ein TRUMPF TruDisk 8000 mit 8 kW zum Einsatz.

Untersucht wurden Bauteile aus AlSi10Mg und 1.4404, jeweils in vertikaler und horizontaler Bauorientierung und in unterschiedlichen Wandstärken (2–8 mm bei AlSi10Mg, 3–9 mm bei 1.4404), Abbildung 6.

Die Proben wurden teils konventionell (CM), teils additiv (AM) gefertigt und wiesen unterschiedliche Vorbereitungszustände (gesägt, gefräst, unbehandelt) auf.

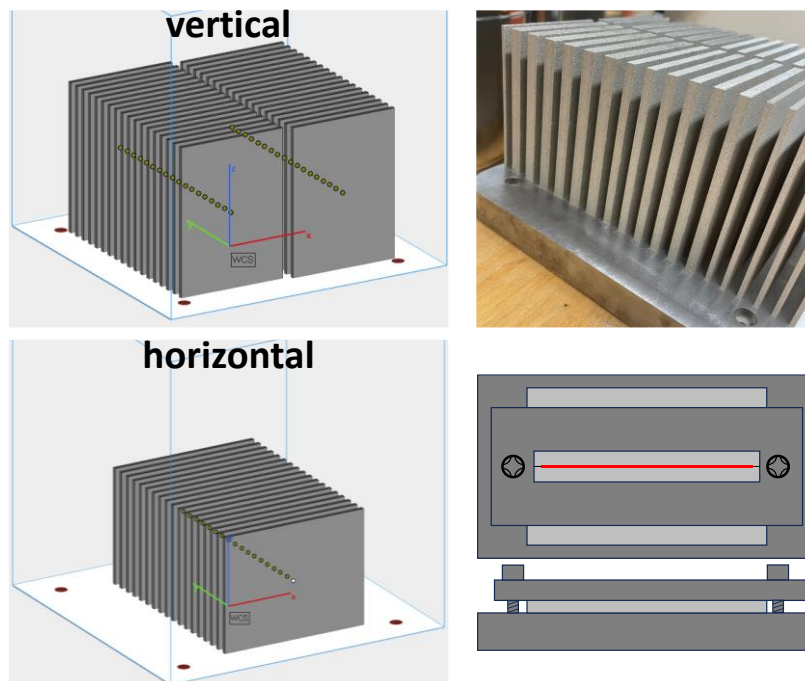


Abbildung 6: Ausrichtung der Bauteile sowie für das Schweißen verwendete Spannvorrichtung.

Beim Schweißen von AlSi10Mg zeigten sich durchgehend homogene Nahtbilder, sowohl bei AM-AM- als auch bei AM-CM-Verbindungen. Die Prozessparameter lagen typischerweise bei einer Leistung von 500–2000 W, einer Vorschubgeschwindigkeit von 20 mm/s, einer Amplitude von 0,2 mm und einem Prozessdruck von etwa 20 mbar. Abbildung 17 zeigt exemplarische Quer- und Planschliffe sowie die zugehörigen Parameter, die aus der umfangreichen Versuchsdokumentation zur Ergebnisdarstellung ausgewählt wurden.

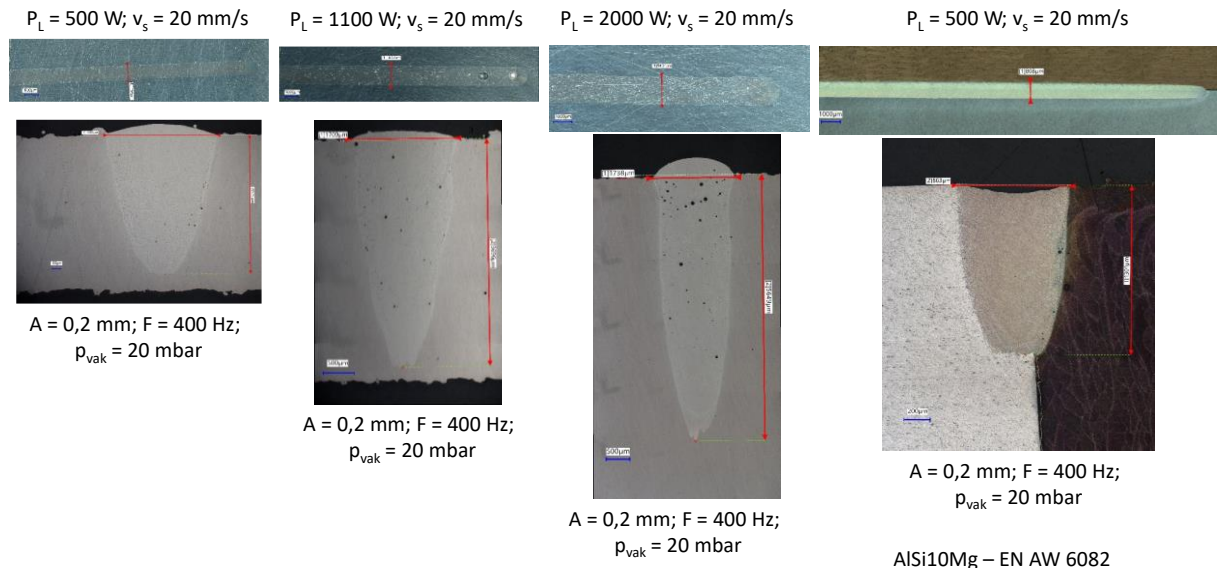


Abbildung 7: Exemplarische Schweißergebnisse aus der an AlSi10Mg durchgeführten Versuchsreihe. Die Blechdicken sind wie folgt. VLNR: 2 mm; 4 mm; 8 mm; 4 mm

Die Schweißversuche an 1.4404 zeigten hingegen deutliche Unterschiede abhängig vom Oberflächenzustand. Während gefräste oder gesägte Oberflächen durchgehend zu guten Ergebnissen führten, traten bei unbehandelten („as built“) Proben Probleme auf. Bei 3 mm dicken Blechen wurde keine vollflächige Anbindung der Bleche erreicht. Auch bei 6 mm starken Proben reichte die Oberflächenqualität im Rohzustand ohne Anpassung nicht für eine anwendungskonforme Nahtqualität aus. Abbildung 8 zeigt exemplarische Querschliffe sowie die zugehörigen Parameter, die aus der umfangreichen Versuchsdokumentation zur Ergebnisdarstellung ausgewählt wurden.

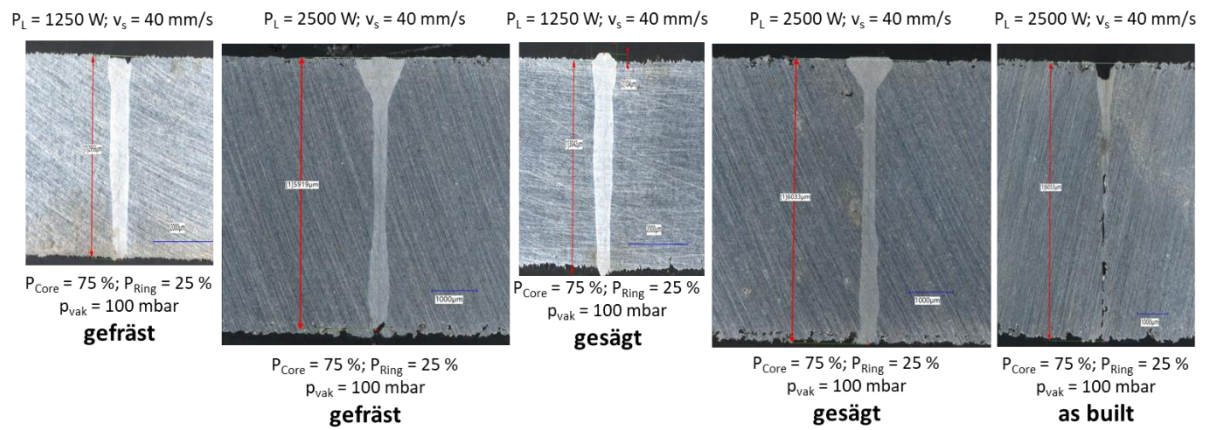


Abbildung 8: Exemplarische Schweißergebnisse aus der an 1.4404 durchgeführten Versuchsreihe. Die Blechdicken sind wie folgt. VLNR: 3 mm; 6 mm; 3 mm; 6 mm; 6 mm

Die Ursache der Problematik ist in den zwischen den Bauteilen entstehenden Spalten zu sehen. Die gemessenen Spaltmaße in der Spannvorrichtung reichten von ca. 99–226  $\mu\text{m}$ , wobei horizontal gebaute Bauteile tendenziell größere Spaltbreiten aufwiesen. Die Oberflächen zeigten in vertikaler Orientierung eine mittlere Konkavität von 100  $\mu\text{m}$ , in horizontaler Bauweise sogar bis zu 200  $\mu\text{m}$ , Abbildung 9.

vertikal



horizontal

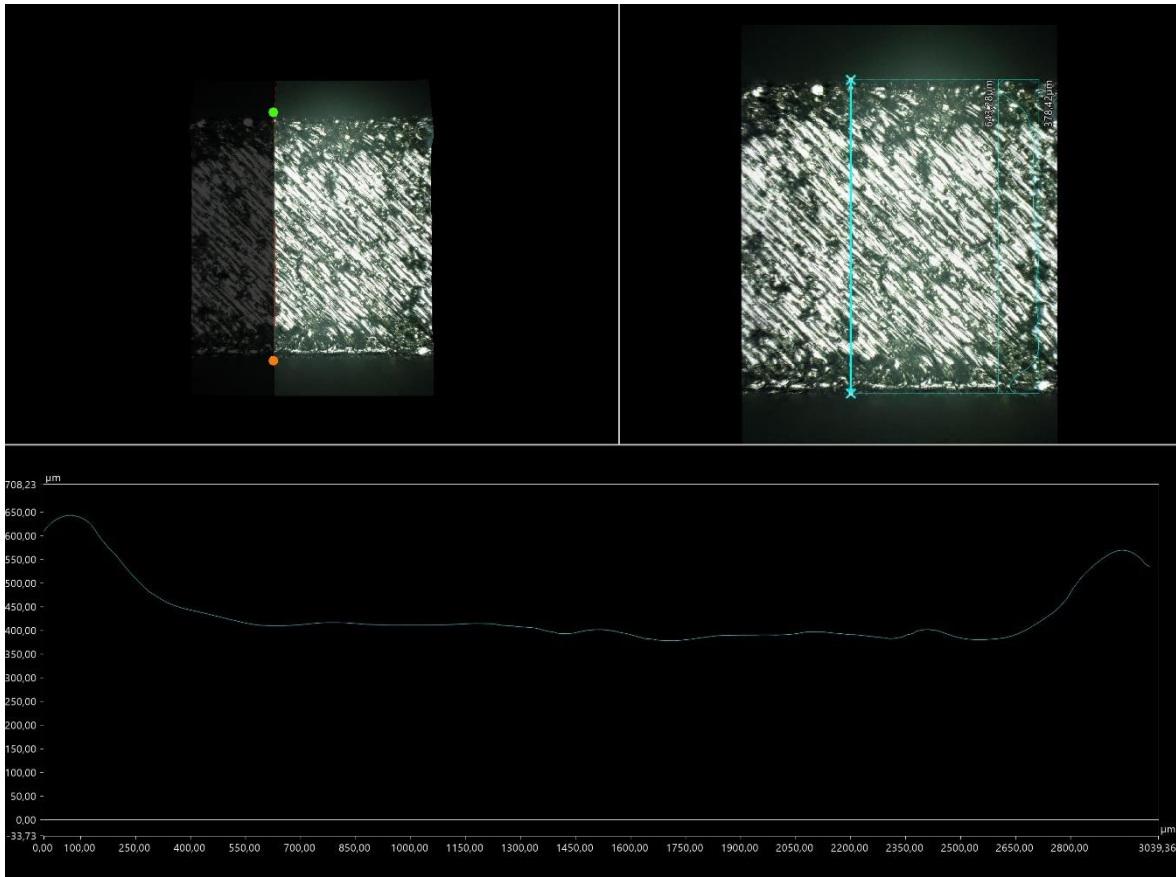


Abbildung 9: Oben: Mikroskopmessung des Spaltes für im LPBF-Prozess vertikal und horizontal aufgebaute Bleche. Unten: Mikroskopaufnahme und 3d-Vermessung der Bauteilkante bei einem horizontal aufgebauten Blech.

Bei CleanLaser durchgeführte Untersuchungen zum Umschmelzen der Kanten konnten zwar eine Verringerung der Spaltweite erreichen, ein technischer Nullspalt konnte allerdings nicht durch diesen Bearbeitungsschritt erzeugt werden.

Um der Problematik des Nichtaufschmelzens der Kanten zu begegnen und eine anwendungskonforme Spaltüberbrückbarkeit zu erreichen, wurde ein umfangreiches Versuchsprogramm auf Basis eines Design of Experiment durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass mit Einstellung einer für das Laserstrahlschweißen eigentlich unübliche großen Amplitude von  $A = 1,3 \text{ mm}$  bei einer vergleichsweise geringen Frequenz von

Gefördert durch:

100 Hz Schweißnähte erzeugt werden konnten, bei denen die Blechflanken aufgeschmolzen wurden. Im Fall von gesägten Blechen konnte wieder eine anwendungskonforme Schweißnaht erreicht werden. In dem „as built“ Zustand der Bleche ergab sich hingegen eine starke einseitige Randkerbe. In diesem Fall ist aber schon eine kleine mechanische Bearbeitung in Form des Kantenbrechens mit einer Feile ausreichend, um auch hier eine anwendungskonforme Schweißnahtqualität zu erreichen, Abbildung 10.

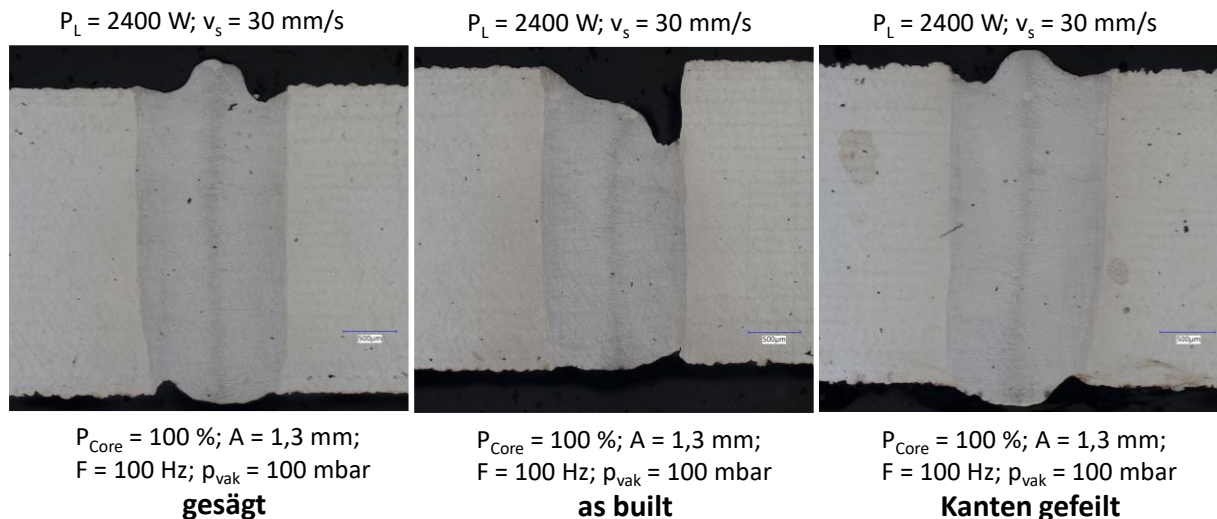
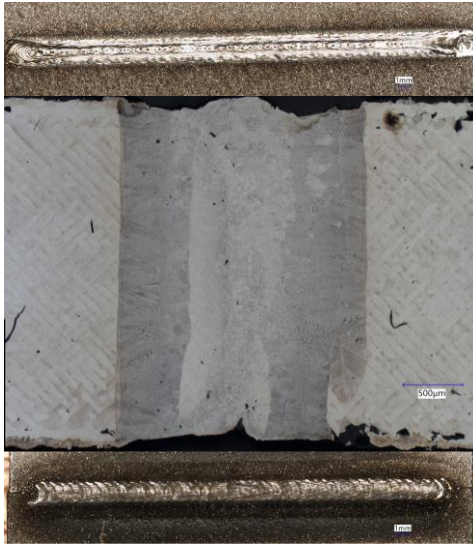


Abbildung 10: Exemplarische Schweißergebnisse aus der an 1.4404 durchgeführten Versuchsreihe mit optimierten Parametern zur Erhöhung der Spaltüberbrückbarkeit.

Um die Spaltüberbrückbarkeit weiter zu verbessern, wurden die Prozessparameter gezielt weiter optimiert. Auch hier wurde ein umfangreiches Versuchsprogramm auf Basis einer DOE durchgeführt. Die vielversprechendsten Ergebnisse wurden beispielsweise mit einer Oszillationsamplitude von  $A = 2$  mm erreicht, die Frequenz musste aufgrund der verwendeten Fokussieroptik auf  $F = 50$  Hz reduziert und die Laserleistung bei vertikal gebauten Proben auf bis zu 3100 W gesteigert werden. Mit diesen Parametern konnte sowohl in der vertikalen als auch in der horizontalen Position gedruckte Bleche ohne nennenswerte Defekte gefügt werden, Abbildung 11.

$P_L = 3100 \text{ W}; v_s = 30 \text{ mm/s}$



$P_{\text{Core}} = 100 \%$ ;  $A = 2 \text{ mm}$ ;  
 $F = 50 \text{ Hz}$ ;  $p_{\text{vak}} = 100 \text{ mbar}$

**vertikal as built**

$P_L = 2900 \text{ W}; v_s = 30 \text{ mm/s}$



$P_{\text{Core}} = 100 \%$ ;  $A = 2 \text{ mm}$ ;  
 $F = 50 \text{ Hz}$ ;  $p_{\text{vak}} = 100 \text{ mbar}$

**horizontal as built**

Abbildung 11: Finale Schweißergebnisse aus der an 1.4404 durchgeführten Versuchsreihe mit optimierten Oszillationsparametern zur Erhöhung der Spaltüberbrückbarkeit.

Die Ergebnisse zeigen insgesamt das große Potenzial des Laserstrahlschweißens im Vakuum zur Integration additiv gefertigter Komponenten in hochdichte, großvolumige Systeme. Gleichzeitig verdeutlichen sie die Notwendigkeit, additive und schweißtechnische Prozesse eng miteinander zu verzahnen, um reproduzierbare und prozesssichere Ergebnisse zu erzielen.

### 3.2 3d-Bahnplanung

Zur Verwendung gilt es neben der Schweißparameterentwicklung das LaVa-Verfahren auf die komplexeren Geometrien mittels 3D Bahnführung zu übertragen. Dazu wurden die in den vorausgegangenen Arbeitspaketen definierten Schnittstellen innerhalb der Anlagensteuerung umgesetzt und die Steuerungssoftware entsprechend angepasst. Zu diesem Zweck wurde die Anlage konkret um zwei weitere CNC-Achse inklusive der entsprechenden Automatisierungskomponenten erweitert, sodass eine vollständige 3D Bearbeitung möglich ist.

Im Rahmen des Projekts wurde ein grundlegender Ansatz entwickelt, um die Integration eines Laserschweißprozesses in eine bestehende Prozesskette zur Herstellung geometrisch komplexer, mittels Laser Powder Bed Fusion (LPBF) gefertigter Bauteile zu vereinfachen. Exemplarisch werden die Ergebnisse anhand des im Projekt entwickelten Demonstrators beschrieben.

Als Demonstrator wurde eine Hinterradschwinge eines Fahrrads ausgewählt, Abbildung 12. Diese kann mittels additiver Fertigung hinsichtlich einiger Aspekte optimiert werden. Das Knotenelement soll hier als Beispiel mit konventionell gefertigten Rechteckrohrbauteilen verschweißt werden.

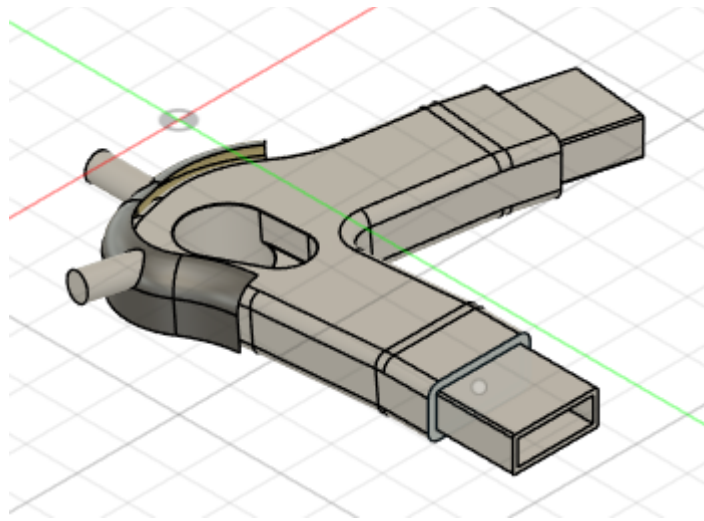


Abbildung 12: Demonstrator nach Vorbild einer Hinterradschwinge beim Fahrrad

Zu diesem Zweck wurde zunächst die Schweißnahtkontur anhand eines CAM-Programms aus der 3D-Datei des Bauteils – gegebenenfalls nach einer vorherigen Laserreinigung – ausgewählt und in einen entsprechenden Werkzeugweg überführt. Dieser Werkzeugweg wurde anschließend in maschinenlesbare Befehle (G-Code) konvertiert.

Damit der generierte G-Code auf einer Schweißmaschine der LaVa-X GmbH ausgeführt werden kann, waren verschiedene Anpassungen notwendig. Dazu zählen Korrekturen der Bahnführung, die Parametrisierung der Laserleistung, die Integration von Wobble-Bewegungen sowie das Entfernen irrelevanter Steuerbefehle wie Werkzeugwechsel oder Spindelbefehle. Ebenso wurden spezifische Vakuumparameter berücksichtigt. Ziel dieser Vorgehensweise war es, eine durchgängige Automatisierung und Standardisierung des Laserschweißens für LPBF-Bauteile zu ermöglichen.

Zur Umsetzung des Projekts wurden verschiedene Werkzeuge und Softwarelösungen verwendet. Die Werkzeugwegerstellung erfolgte mit Autodesk Fusion 360 inklusive der Manufacturing Extension. Als Schweißanlage kam die LaVaCELL 450 zum Einsatz – ein System mit XZ-Portal, innenliegendem Y-Tisch sowie integrierten A- und B-Rotationsachsen, Abbildung 13. Diese Anlage diente sowohl als physische Basis für den Schweißprozess als auch als Grundlage für das simulationsfähige Maschinenmodell. Für die Bearbeitung des G-Codes sowie die Parametrierung der Achsen wurde Twin-CAT 3 mit dem CNC-Modul verwendet.



Abbildung 13: LaVaCELL 450 Anlage

Im Verlauf des Projekts wurde die ursprüngliche 3-Achs-Konfiguration der Anlage (X-Y-Z) um zwei zusätzliche Rotationsachsen erweitert. Dabei kam eine Kombination aus einem außenliegenden Beckhoff-Motor (400 V) und einem innenliegenden Motor von Jenny Science (48 V) zum Einsatz. Parallel dazu wurde die Steuerung auf eine 5-Achs-CNC erweitert. Abbildung 14 zeigt die 5-Achs-Konfiguration der LaVaCELL 450.



Abbildung 14: Modularer Aufbau der LaVaCELL mit für den Anwendungsfall ausgewählten Komponenten.

Zur Vorbereitung des simulationsfähigen Maschinenmodells wurden relevante Komponenten aus einem bestehenden Modell extrahiert. Die Schweißkammer inklusive Motorik wurde als feststehender Kammerblock definiert, während der Schweißkopf als Werkzeughalter auf dem XZ-Portal abgebildet wurde, Abbildung 15.

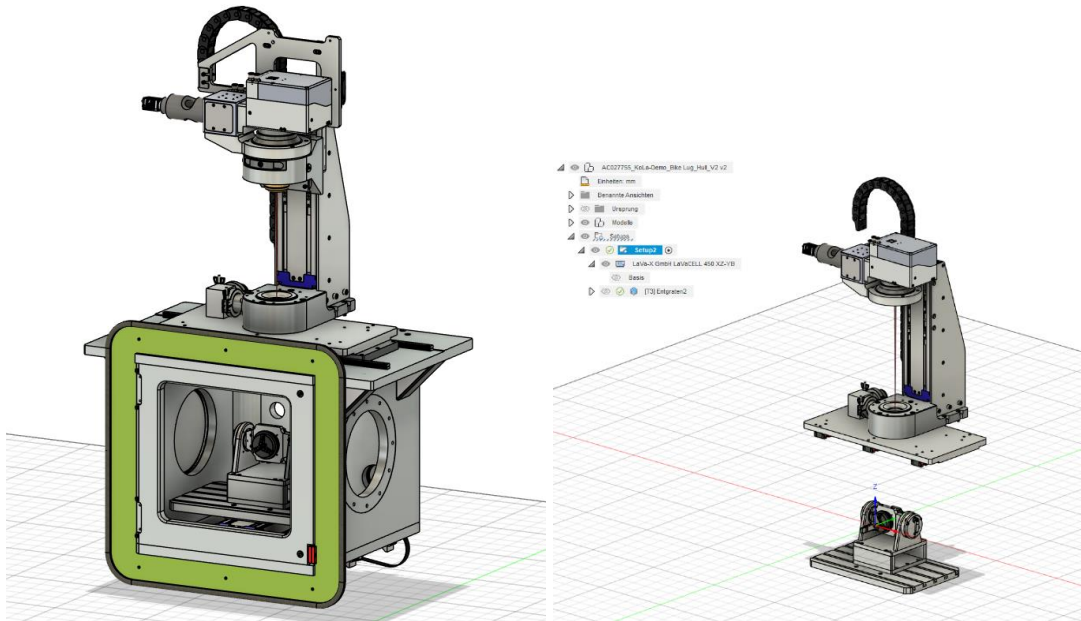


Abbildung 15: Simulationsfähiges Maschinenmodell in Autodesk Fusion 360

Die B-Achse erhielt ein Dreibackenfutter zur Halterung des Werkstücks, Abbildung 16. Aufgrund der unterschiedlichen Maßeinheiten von Linear- (mm/sec) und Rotationsachsen ( $^{\circ}$ /sec) wurde das Maschinenmodell für einen Inverszeit-Vorschub konfiguriert. Da Beckhoff CNC den RTCP-Modus nicht vollständig unterstützt, musste diese Methode als Alternative eingesetzt werden.

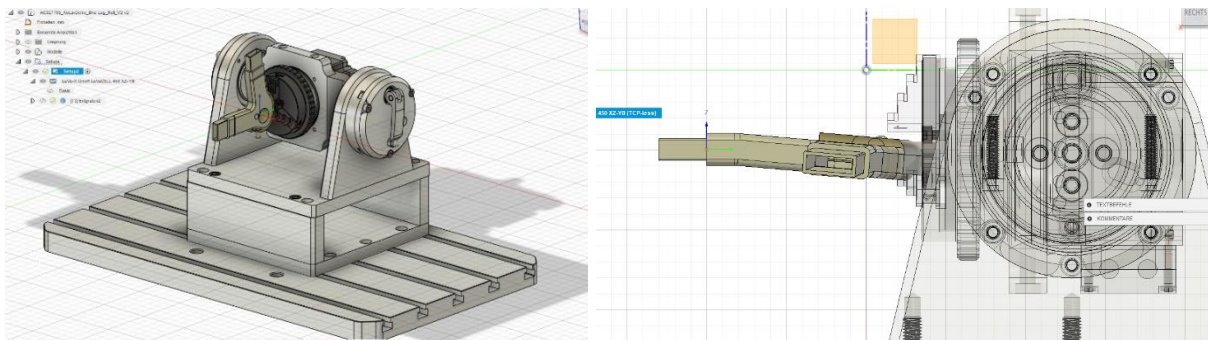


Abbildung 16: Aufbau der Werkstückaufspannung in Autodesk Fusion 360.

Für die G-Code-Generierung wurde ein generischer Postprozessor für eine 4-Achsen-Fräsmaschine (Mach4Mill) ausgewählt und entsprechend angepasst. Dabei wurden unter anderem die Standardeinheit auf mm/sec umgestellt, Inverszeit-Werte gemäß Beckhoff-Konvention in Zeilenbearbeitungszeiten umgerechnet und zusätzliche Prozessparameter wie Wobble-Strategien sowie eine statische Laserleistung integriert. Darüber hinaus wurde die Koordinatenausgabe auf relative Werte umgestellt.

Der virtuelle Versuchsaufbau wurde so realitätsnah wie möglich dem tatsächlichen Aufbau nachempfunden, Abbildung 17. Das Werkstück wurde über eine zylinderförmige Stützstruktur konzentrisch in das Dreibackenfutter eingespannt. Zur Simulation des Laserstrahls wurde ein Kugelkopfräser mit 0,1 mm Durchmesser verwendet, des-

Gefördert durch:

---

sen Länge der Fokusbildung des Laserstrahls entsprach. Ein geringerer Durchmesser hätte zwar die Genauigkeit verbessern können, führte jedoch zu einem Abbruch der Werkzeugwegzeugung.

Für die Werkzeugwegplanung wurden die Strategien „Entgraten“ und „Multi-Achsen-Kontur“ mit unterschiedlichen Vorschubgeschwindigkeiten (10, 20 und 30 mm/sec) getestet. Es zeigten sich keine signifikanten Unterschiede im generierten G-Code bei gleicher Geschwindigkeit. Zunächst wurde ein Trockenlauf ohne Laser zur Prüfung des G-Codes durchgeführt, bevor Schweißversuche mit einer Laserleistung von 160 W auf einem Bauteil mit ähnlichen Abmessungen wie der Demonstrator durchgeführt wurden.

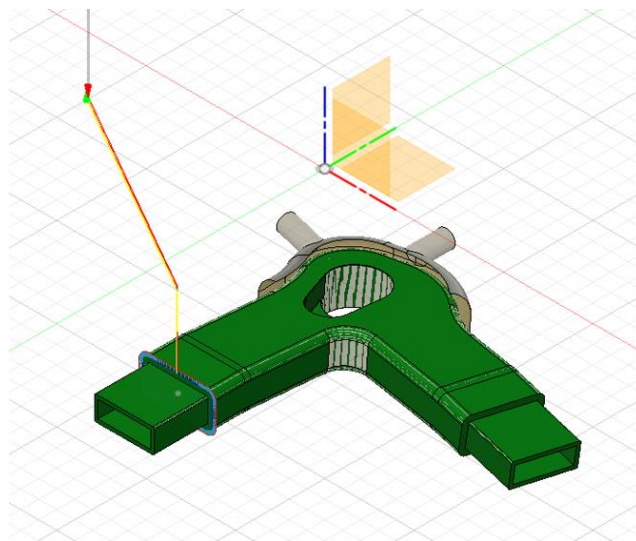


Abbildung 17: In Autodesk Fusion 360 dargestellte Schweißstrajektorie

Nach dem Übertrag des G-Codes aus Autodesk Fusion 360 auf die LaVaCELL450 zeigten sich dennoch einige Herausforderungen. Unter anderem musste aufgrund der Komplexität der Schweißnahtgeometrie eine Optimierung der Achsparameter vorgenommen werden, da die Dynamik der Achsen vor allem bei hohen Schweißgeschwindigkeiten nicht ausreichte. Zusätzlich ergaben sich weitere Herausforderungen hinsichtlich der Maßhaltigkeit des Demonstrators. Hier musste aufgrund von Verzügen eine neue Spannvorrichtung entwickelt werden.

Nach Durchführung der vorgenannten Änderungen konnte die Schweißprozessentwicklung zum Übertrag der Ergebnisse aus dem Kapitel 3.1 auf die Demonstratorbauteile erfolgen. Da die Gegebenheiten des Spaltes sowie der Materialkombination nicht vergleichbar zu denen in Kapitel 3.1 waren, erfolgte hier eine weitere umfangreiche, auf einer DOE basierende Prozessentwicklung.

---

### 3.3 Anwendungserprobung der untersuchten Prozesskette anhand des Demonstrators

Die Demonstratorbauteile lagen zum Zeitpunkt des offiziellen Projektendes noch nicht vor. Daher konnten die Schweißungen an den Bauteilen nicht mehr während der Projektlaufzeit erfolgen. Die im folgenden Beschriebenen Arbeiten wurden entsprechend nach dem offiziellen Projektabschluss durchgeführt und finden sich daher ggf. nicht in den Schlussberichten der anderen Partner wieder.

Nach Abschluss und Umsetzung der 3d-Bahnplanung konnte die Schweißprozessentwicklung für die Produktion des Demonstrators umgesetzt werden. Hintergrund dieser erneuten Anpassung der Schweißparameter lag darin begründet, dass sich bei der Kombination des LPBF-gefertigten Demonstrators mit dem konventionell gefertigten Rechteckrohr des Werkstoffs 1.4404 nennenswerte Änderungen hinsichtlich der Materialeigenschaften (bspw. Porosität) aber auch hinsichtlich der geometrischen Begebenheiten (bspw. Spalte oder Kantenversätze) ergeben.

Aus diesem Grund erfolgten zunächst Versuche an dem Rechteckrohr, um die Einschweißtiefe und Schweißnahtbreite bei einer Einschweißung zu bestimmen. Zu diesem Zweck erfolgte zunächst erneut ein umfangreiches Versuchsprogramm auf Basis einer DOE, die um die in Kapitel 3.1 entwickelten Parameter aufgespannt wurden. Abbildung 18 zeigt einen Schweißversuch an dem in der LaVaCELL450 realisierten Versuchsaufbau.

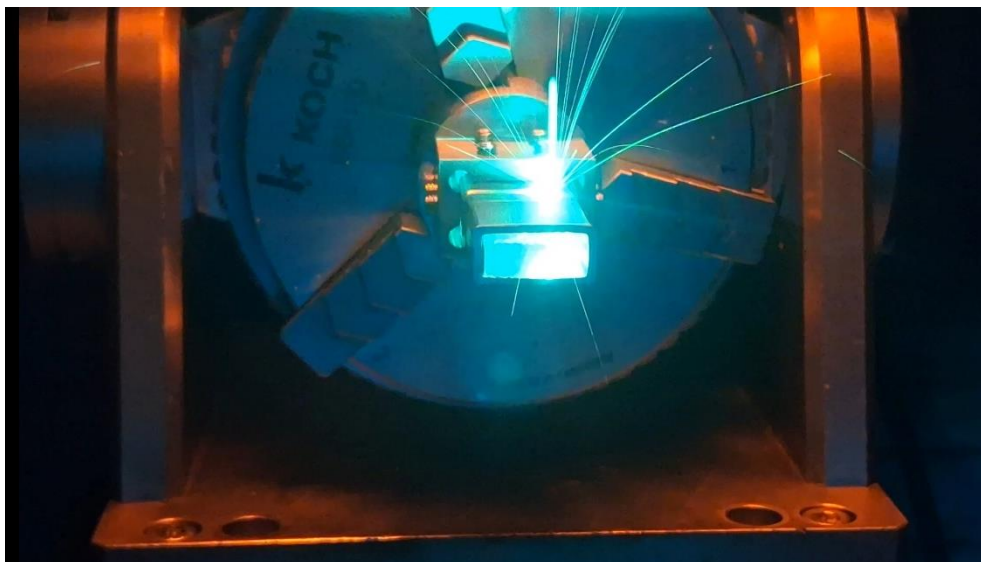


Abbildung 18: Schweißprozessentwicklung an der Demonstratorgeometrie

Aufgrund der geringen Materialdicke von nur 1,25 mm konnte die Strahlleistung auf 480 W reduziert werden. Da die Achsdynamik für hohe Schweißgeschwindigkeiten zu gering ist, wurde die maximale Schweißgeschwindigkeit auf 20 mm/s festgelegt. Bei

---

der vorgenannten Leistung und Schweißgeschwindigkeit konnten mit einer Oszillationsamplitude von 0,4 mm bei einer Frequenz von 200 Hz eine vollständige Durchschweißung an dem Rechteckrohr erreicht werden.

Diese Parameter wurden danach zunächst auf ein LPBF-gefertigtes Dummybauteil übertragen, sodass die Ausbildung der Schweißnaht bei der Materialkombination additiv/konventionell ermittelt werden konnte. Nach Durchführung einiger Tests an den Dummybauteilen, wurde der Prozess schlussendlich auf dem Demonstrator angewendet. Abbildung 19 zeigt den Schweißprozess an dem Demonstrator in der LaVa-CELL450.

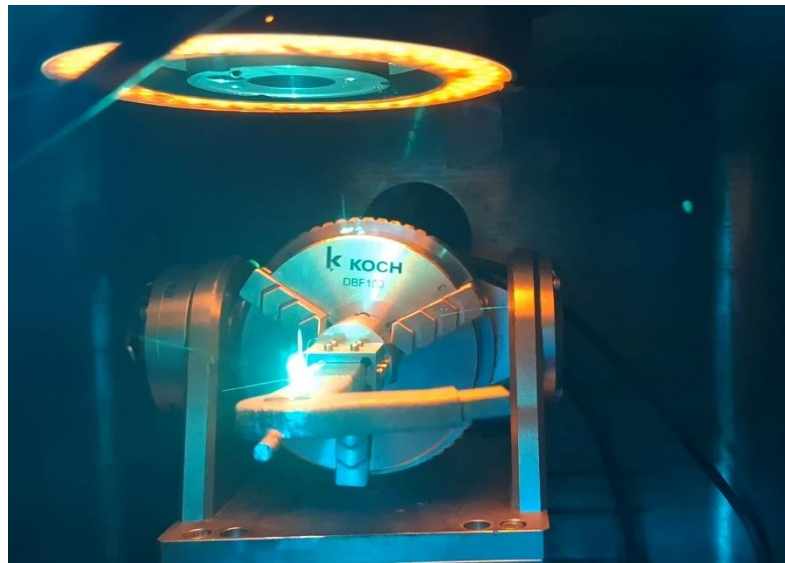


Abbildung 19: Durchführung der Schweißung an dem Demonstratorbauteil

Das Ergebnis der Schweißung an dem Demonstrator zeigt, dass eine gleichmäßige Schweißnaht ohne signifikante Konvexitäten oder Randkerben erzeugt werden konnte, Abbildung 20. Allein in den Eckenradien zeigt sich eine leichte Verbreiterung der Schweißnaht. Diese ist zum einen darauf zurückzuführen, dass in dem Eckenbereich eine Richtungsumkehr der X-Achse erfolgen muss. Aufgrund der niedrigen Achsdynamik ist hier eine kurze Verweilzeit ohne Relativgeschwindigkeit unvermeidbar. Zum anderen stimmen die Radien des Rechteckrohrs nicht komplett mit denen des Demonstratorbauteils überein.

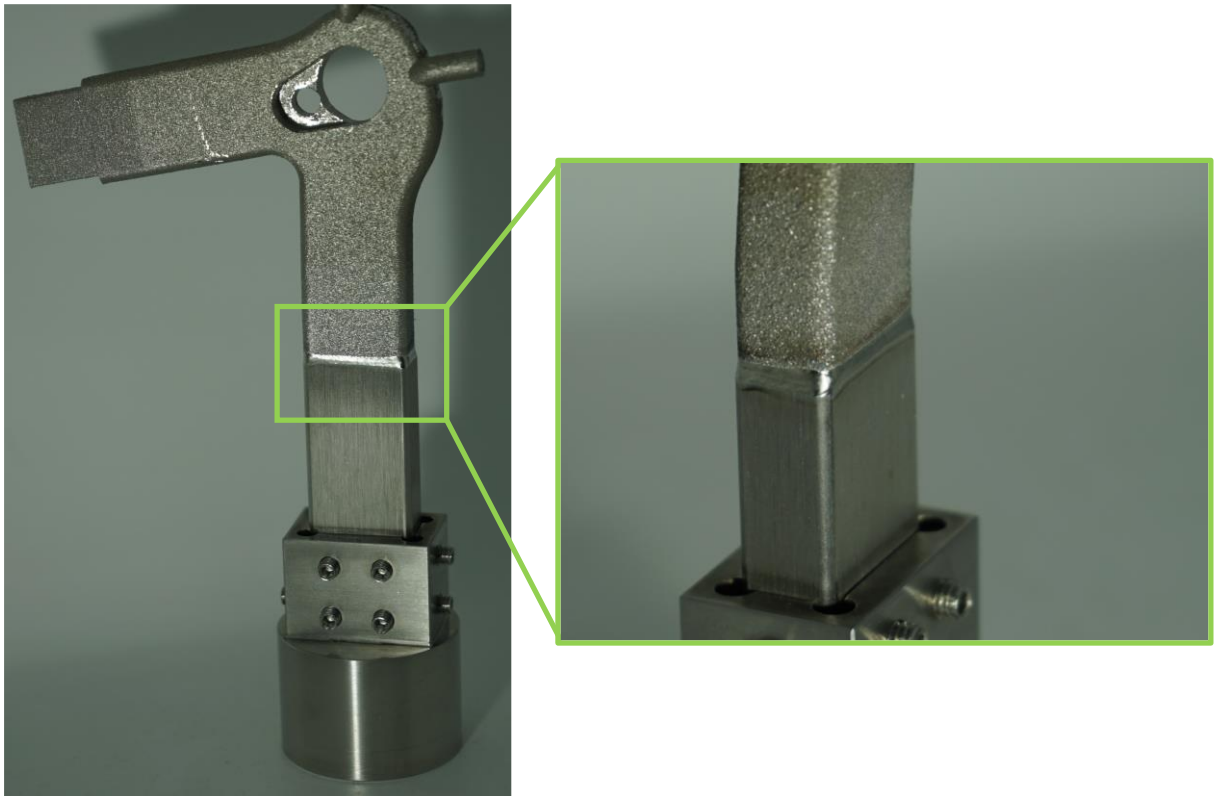


Abbildung 20: Schweißergebnis an dem Demonstratorbauteil

Abschließend bleibt zu vermerken, dass die Prozessierbarkeit LPBF-gefertigter Bauteile durch die im Projekt durchgeführten Entwicklungsschritte signifikant erweitert wurde. Dies lässt sich sowohl auf den Schweißprozess als solchen als auch auf die 3d-Bahnplanung übertragen.

#### 4 Quellenverzeichnis

- [1] Hermann, S. 3i-PRINT Individualize - integrate - innovate. Zugriff am: 19.01.2022. Verfügbar unter: <https://www.3iprint.de/>
- [2] N.N. Airbus APWorks zeigt "Light Rider" - Weltweit erstes Elektromotorrad aus dem 3D-Drucker. Verfügbar unter: <https://www.motorradreporter.com/artikel/airbus-apworks-zeigt-light-rider-weltweit-erstes-elektromotorrad-aus-dem-3d-drucker>
- [3] Gill, M. und andere, 2020. Joining Technologies for Metal Additive Manufacturing in the Energy Industry. In: JOM 72, 2020, 12, S. 4214–4220. doi: 10.1007/s11837-020-04441-9.
- [4] N.N. Joining Solutions for additive Manufacturing. Zugriff am: 2020. Verfügbar unter: ESA-GSTP-TEXMSP-SOW-020671
- [5] Schwarz, A. und andere, 2021. WELDING OF ADDITIVE MANUFACTURED ALSI10MG: USING LASER WELDING IN A VACUUM FOR

Gefördert durch:

---

HIGH QUALITY WELD SEAMS — A NEW APPROACH TO WELDING LPBF MANUFACTURED ALSI10MG. In: South African Journal of Industrial Engineering 32, 2021, 4, doi: 10.7166/32-4-2513.

- [6] N.N. INNOTECH LASER: Schneid- und Schweißköpfe. Zugriff am: 31.01.2022. Verfügbar unter: <https://www.innotech-laser.de/index.php/de/produkte/schneid-koepfe>
- [7] N.N.: Trumpf Bearbeitungsoptiken. Zugriff am: 31.01.2022. Verfügbar unter: [https://www.trumpf.com/de\\_DE/produkte/laser/bearbeitungsoptiken/](https://www.trumpf.com/de_DE/produkte/laser/bearbeitungsoptiken/)
- [8] N.N., 2016. Jahresbericht 2016: Laserpolieren von SLE-gefertigten Glasbauteilen. Aachen
- [9] Flemmer, J. und andere, 2015. Machine Tool and CAM-NC Data Chain for Laser Polishing Complex Shaped Parts. In: Advanced Engineering Materials 17, 2015, 3, S. 260–267. doi: 10.1002/adem.201400476.
- [10] McDonald, M. W. und andere, 2020. Practical implementation of laser polishing on additively manufactured metallic components. In: Journal of Laser Applications 32, 2020, 4, S. 42019. doi: 10.2351/7.0000222.
- [11] Zhu, L. und andere, 2020. The weld quality improvement via laser cleaning pre-treatment for laser butt welding of the HSLA steel plates. In: Welding in the World 64, 2020, 10, S. 1715–1723. doi: 10.1007/s40194-020-00949-5.
- [12] Gerhards, B. und Weichert, T. EPIC Online Technology Meeting on Laser Ablation and Laser Cleaning: Success-Story Laser ablation and laser welding. Verfügbar unter: <https://epic-assoc.com/events/epic-online-technology-meeting-on-laser-ablation-and-laser-cleaning/>
- [13] Selmi, H. und andere, 2023. Weldability of 316L Parts Produced by Metal Additive Manufacturing. In: Journal of Manufacturing and Materials Processing 7, 2023, 2, S. 71. doi: 10.3390/jmmp7020071.