

Abschlussbericht im BMBF Rahmenprogramm „Vom Material zur Innovation“

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| Vorhabenbezeichnung: AluNanoCore - Hochfeste nanoverstärkte Aluminium Fülldrähte für lichtbogenbasiertes ALM Teilvorhaben: „Fertigungsstrategien für 3D-Komponenten aus nanoverstärkten Aluminium-Fülldrähten“ | |
| Zuwendungsempfänger: KSC | Förderkennzeichen 03XP0234D |
| Projektleiter*in Sven Köhler | Berichtszeitraum 01.10.2019 - 30.09.2023 |

I. Teil I: Kurzbericht

Im Rahmen des Verbundprojektes „Hochfeste nanoverstärkte Aluminium Fülldrähte für lichtbogenbasiertes ALM“ bestand die Aufgabe der KSC Kraftwerks - Service Cottbus Anlagenbau GmbH in der Fertigungsstrategien für 3D-Komponenten aus nanoverstärkten Aluminium-Fülldrähten, die eine funktionale, höchsteffiziente und schnelle Herstellungsmethode der Ersatzteilen bieten.

Die Effizienz in der Produktion, Instandhaltung und Reparatur von Schienenfahrzeugen wird durch den Einsatz additiver Fertigungstechnologien verbessert. Diese ermöglichen eine schnelle Herstellung von Ersatzteilen vor Ort, wodurch Lieferzeiten erheblich verkürzt werden können. Die additive Fertigung reduziert die Fertigungszeit für Bauteile um bis zu 95 Prozent und bietet zusätzliche Vorteile wie eine Vielfalt an Gestaltungsmöglichkeiten und verbesserte mechanisch-technologische Eigenschaften.

Der Schwerpunkt liegt derzeit auf lichtbogenbasierten additiven Fertigungsmethoden für Werkstoffe, die in der Luftfahrt und anderen hochpreisigen Anwendungsbereichen eingesetzt werden. Aluminiumlegierungen sind aufgrund ihrer guten Verfügbarkeit und Zerspanbarkeit noch nicht weit verbreitet, da es begrenzte wirtschaftliche Anwendungsfelder gibt und Standard-Massivdrähte mit geringer Festigkeit verwendet werden. Um die Festigkeit von additiv gefertigten Aluminiumbauteilen zu steigern, wird ein neuer Ansatz mit nanomodifizierten Schweißzusatzwerkstoffen in Form von Fülldrähten verfolgt. Dies soll zu leichteren und verbesserten Komponenten führen. Das Projekt zielt darauf ab, auf wissenschaftlicher Basis Fertigungsstrategien zu entwickeln und zu erproben, um den Einsatz dieser neuen Zusatzwerkstoffe außerhalb des Labors zu ermöglichen. Dabei werden ALM-Bauteilherstellungsmethoden mit Lichtbogen untersucht und bewertet, um das Leichtbaupotenzial zu maximieren.

Das Projekt umfasst ein material- und prozessorientiertes Bauteildesign sowie die Analyse der Beziehung zwischen ALM-Prozessparametern, Werkstoff- und Bauteileigenschaften, um qualifizierte Fertigungsstrategien abzuleiten.

Für KSC ergab sich aus der beschriebenen Ausgangssituation der folgende Ablauf des Vorhabens:

- Bauteilgerechte Qualifizierung der lichtbogenbasierten ALM Fertigung mit nanoverstärktem Fülldraht (WP 10 Validation of AluNanoCore for wire arc ALM processes in industrial environment)
- Demonstration der Bauteilfertigung mit AluNanoCore (WP 11 Demonstration in industrial environment)
- Werkstoff- und Bauteilcharakterisierung (WP 12 Characterisation of microstructure and mechanical properties of wire arc processed components)

Trotz erschwelter Randbedingungen infolge der Corona-Pandemie und der damit verbundenen Einschränkungen und Schwierigkeiten bei der Herstellung der nanoverstärkten Aluminium-Fülldrähte konnte das Projekt durch die Herstellung von 3D-Demonstratoren mit relativ komplexen Strukturen erfolgreich beendet werden.

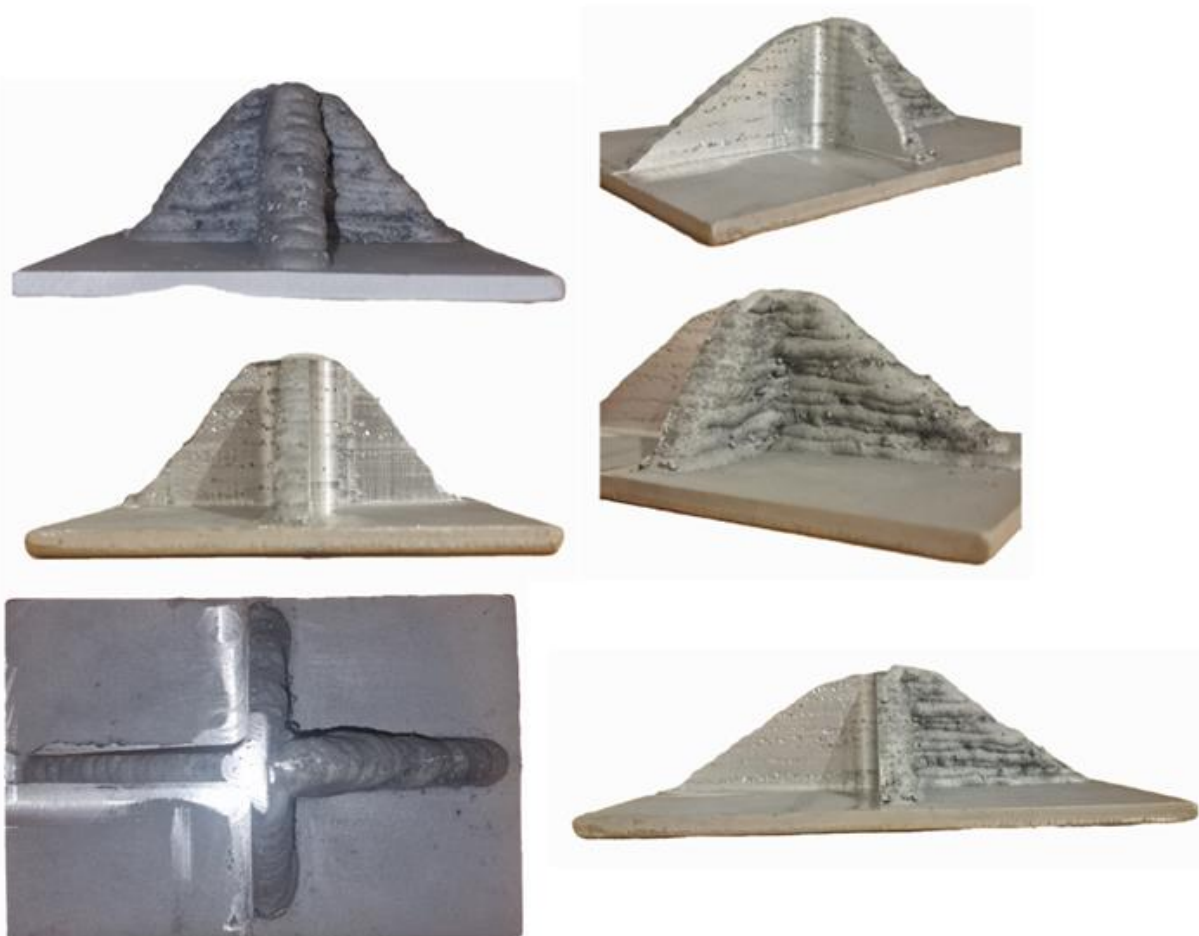


Abbildung 1: Demonstrator

Teil II: Ausführliche Beschreibung der durchgeführten Arbeiten

[illegible]

AP 1.1: Referenzuntersuchungen mit konventionellen Al- Massivdrähten

Im Rahmen des ersten Arbeitspakets wurden Referenzdaten für additiv gefertigte Bauteile aus Aluminium erhoben. Dazu wurde ein Schweißarbeitsplatz eingerichtet, der speziell für Schweißversuche mit Aluminium umgerüstet wurde. Die Abbildung 3 zeigt den Schweißarbeitsplatz mit dem Kuka Knickarmroboter und der Fronius CMT Schweißstromquelle. Spezielle Kunststoffförderrollen wurden für die Drahtzuführung verwendet, um eine Verformung des Aluminiumdrahts zu vermeiden. Darüber hinaus wurde das Schlauchpaket mit einer Teflonseele ausgestattet, um einem möglichen Abrieb des Aluminiumzusatzwerkstoffs während des Drahtzuführungsprozesses im Schweißprozess entgegenzuwirken.



Abbildung 3: Der Schweißarbeitsplatz

Gemäß dem aktuellen Stand der Technik sind Massivdrähte zum Verschweißen aus AlSi5 verfügbar, die von unserem Projektpartner MIGAL.Co für die Evaluierung mit dem Lichtbogenauftragsschweißen bereitgestellt wurden. Als Substratmaterial wurde der gut schweißbare Aluminiumwerkstoff Al-6082 gewählt.

Im ersten Schritt wurde die Roboterprogrammierung sowohl für eine einfache Liniengeometrie als auch für die definierte ovale Form, wie in Abbildung 4 dargestellt, ausgelegt. Die Verwendung der einfachen Liniengeometrie ermöglichte die Evaluierung der Schweißparameter für das Lichtbogenauftragsschweißen mit AlSi5. Die Fertigung des Ovals ermöglichte die Erhebung von Referenzdaten für AlSi5. Zu diesem Zweck wurde ein Probenentnahmeplan festgelegt.

Aus dem gefertigten Oval sollen Proben für die Zugfestigkeit, Härte, den Wasserstoffgehalt und die Beurteilung des Gefüges gewonnen werden. In Abbildung 4 ist das skizzierte Rechteck dargestellt, das aus dem Oval herausgeschnitten werden soll und für die Probenentnahme genutzt werden soll. Nach der Fertigung durch das Lichtbogenauftragsschweißen muss es eine Höhe von 150 mm, eine Länge von 165 mm und eine Tiefe von 8 mm aufweisen, um die definierten Proben entnehmen zu können.

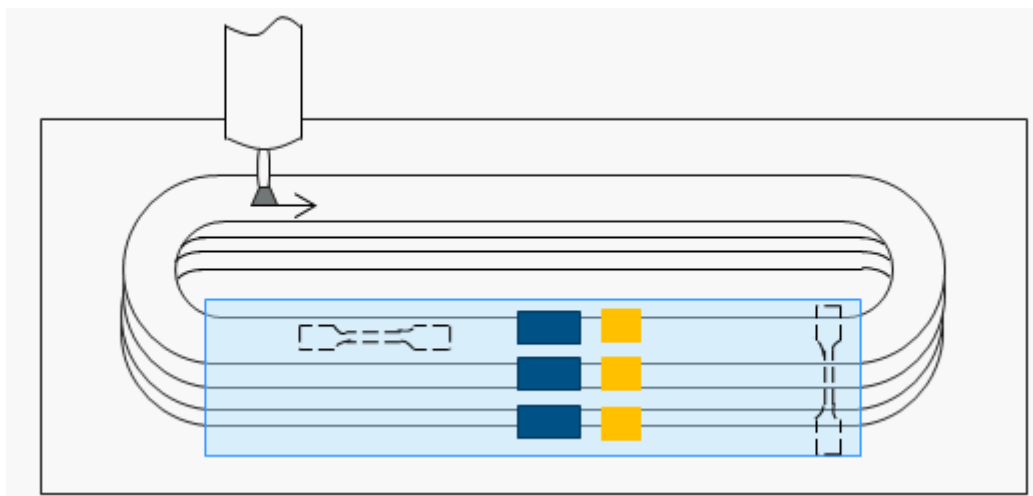


Abbildung 4: Definierte Wandstruktur für die Erhebung von Referenzdaten

Für die erste Lage wurden die Schweißparameter an einfachen 120 mm langen Schweißraupen erhoben. Dabei wurden sowohl der CMT-Schweißprozess als auch der CMT-Puls, Standard- und Pulsprozess erprobt.

In Abbildung 5 sind die ersten Schweißlagen mit dem CMT-Puls-Schweißprozess zu sehen. Dieser Prozess wies den gleichmäßigsten und am wenigsten unruhigen Verlauf im Vergleich zu den zuvor genannten Prozessen auf.



Abbildung 5: Evaluieren von Schweißparametern für die erste Schweißraupe

Nach der visuellen Prüfung der ersten Schweißraupen wurden die Schweißparameter für die erste Lage festgelegt. Es wurden Parameter ausgewählt, bei denen die Schweißnaht die geringsten sichtbaren Unregelmäßigkeiten aufweist. In Abbildung 6 ist der nächste Schritt der Schweißparameterfindung zu sehen, bei dem mehrere Schweißraupen übereinander geschweißt wurden. Auch in diesem Schritt wurden verschiedene Schweißprozesse erprobt, wobei sich der CMT-Schweißprozess als der gleichmäßigste erwies. Der Lichtbogen verlief bei diesem Prozess am ruhigsten.



Abbildung 6: Evaluieren von Schweißparametern für mehrere Schweißraupen

Allerdings stellte sich die Höhe des Anfangs- und Endpunktes als problematisch heraus. Diese Punkte konnten durch die Einstellung des Sonder-2-Taktes der Fronius CMT-Anlage reguliert werden. Der Sonder-2-Takt ermöglicht die Einstellung der Startstrom-Phase und -Dauer sowie der Endstrom-Phase und -Dauer. Trotz der Evaluierung der Parameter des Sonder-2-Taktes wurde der Anfangs- bzw. Endpunkt niedriger aufgebaut als die mittlere Schweißraupe. Daraufhin wurde die Schweißstrategie angepasst: Der Endpunkt der zuletzt geschweißten Lage wurde nun als Anfangspunkt für die folgende Schweißraupe verwendet und so weiter. Durch diese geänderte Strategie konnte der höhere Startpunkt mit dem niedrigeren Endpunkt im Vergleich zur Mitte der Schweißraupe ausgeglichen werden. In Abbildung 7 wurden die Schweißparameter anhand von Schweißproben erprobt, die eine größere Höhe aufweisen. Die vordere Wandstruktur wurde durch das Übereinanderschweißen von 16 Schweißraupen hergestellt und erreicht eine Höhe von 600 mm. Die zuletzt geschweißte Lage wies deutliche Unregelmäßigkeiten auf, die vermutlich auf einen zu großen Kontaktdüsenabstand und folglich zu geringes Schutzgas an der Schweißstelle zurückzuführen sind.

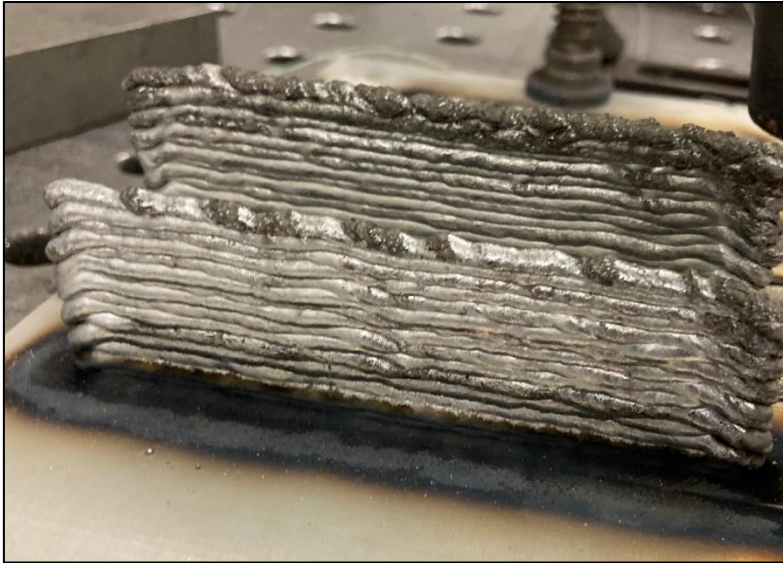


Abbildung 7: Anpassung des Kontaktdüsenabstandes bei höher werdenden Schweißproben

Nach der Anpassung wurde der Kontaktdüsenabstand in der Robotersteuerung korrigiert. Um die durchschnittliche Erhöhung der Schweißraupen zu ermitteln, wurde die Lagenhöhe durch die Anzahl der Schweißraupen geteilt. In Abbildung 8 ist eine Schweißprobe mit einer Höhe von 109 mm zu sehen, die mithilfe der zuvor ermittelten Schweißparameter gefertigt wurde.



Abbildung 8: Schweißprobe mit einer Höhe von 109 mm

Die zuvor beschriebenen Schweißunregelmäßigkeiten traten auch in weiteren Versuchen bei höheren Schweißproben auf. Es wurde vermutet, dass das Schweißgut zu heiß wird und die Wärme zu lange in den oberen Lagen gehalten wird, anstatt wie üblich bei Aluminium, durch die hohe Wärmeleitfähigkeit unmittelbar nach dem Schweißen an die Umgebung und das Substratmaterial abgeleitet zu werden (Wärmestau). Nach Anpassung des Anfangs- und Endpunkts durch den Sonder-2-Takt und den Kontaktdüsenabstand sowie Erreichen einer Höhe von 109 mm für die einfach geschweißten Lagen wurde die zuvor definierte Ovalschweißstrategie erprobt und umgesetzt. Das geschweißte Oval ist in Abbildung 9 dargestellt und hat eine Höhe von 122 mm, aufgebaut aus 73 Lagen. Dabei sind Unregelmäßigkeiten insbesondere ab einer Höhe von 100 mm vermehrt erkennbar.

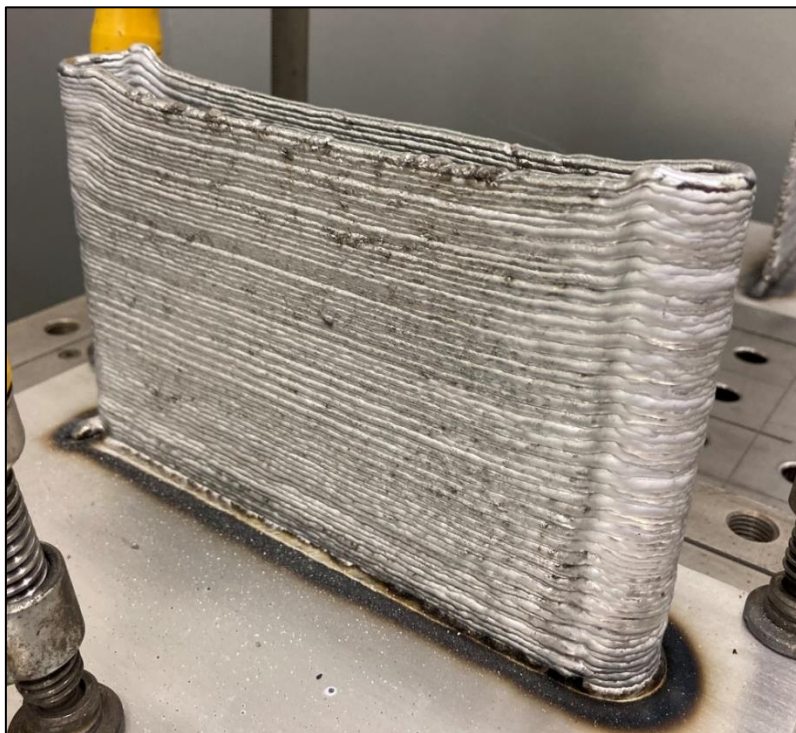


Abbildung 9: Geschweißtes Oval mit einer Höhe von 122 mm und 73 Lagen

Die Schweißparameter wurden anhand dieses Ovals überprüft und angepasst. Ein Problem dabei ist, dass die Dicke der einzelnen Lagen mindestens 8 mm betragen muss, um Zugproben für das Verschweißen von einfachen und einlagigen Wandstrukturen entnehmen zu können, während die Ovale lediglich eine Dicke von 4,7 mm aufweisen. Eine Möglichkeit, die Breite der Schweißraupe der Ovale zu erhöhen, besteht darin, die Schweißgeschwindigkeit anzupassen und zu erhöhen. Dadurch kann die Stromstärke erhöht werden, um eine breitere Schweißraupe zu erzeugen. Zusätzlich wurden in diesem Zusammenhang die Lichtbogenlängenkorrektur und die Pulskorrektur des CMT-Prozesses angepasst. In Abbildung 10 ist ein Oval zu sehen, bei dem die oberste Schweißraupe durch eine höhere Schweißgeschwindigkeit und eine höhere Stromstärke als in den zuvor evaluierten Schweißversuchen gewählt und geschweißt wurde. Die Schweißraupe ist breiter (5,5 mm) als die der zuvor geschweißten Ovale.

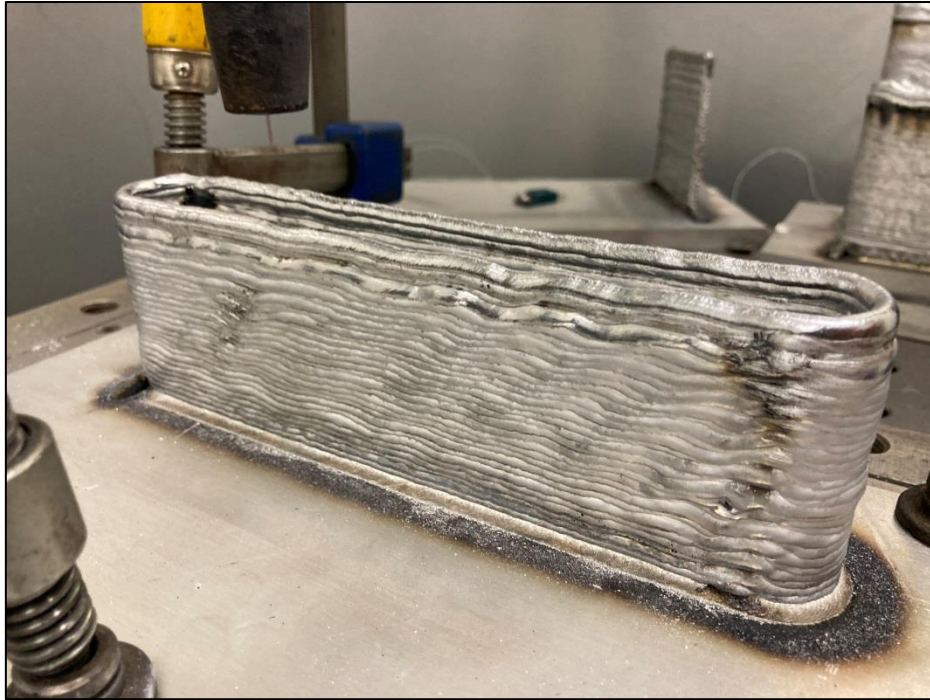


Abbildung 10: Schweißversuch mit dem Ziel die Breite der Schweißraupe zu erhöhen durch höhere Schweißgeschwindigkeit

Aus diesem Grund wurden weitere Schweißversuche mit deutlich erhöhter Stromstärke durchgeführt, um dadurch die Breite der Schweißraupe weiter zu erhöhen. In Abbildung 11 ist ein solcher weiterer Schweißversuch zu erkennen. Die Breite der Lagen liegt nun bei 9 mm, jedoch ist die geschweißte Naht durch einen unruhig verlaufenden Lichtbogen geprägt, was zu einer deutlich erkennbaren unregelmäßigen Schweißnaht führt. Zudem ist ein erhöhter schwarzer Abbrand sichtbar, was darauf hinweist, dass der Zusatzwerkstoff bei diesem Prozess zu heiß geworden ist. Das gewünschte Schweißergebnis sollte folglich zwischen den beiden zuletzt vorgestellten Schweißeinstellungen liegen. Allerdings sind die erprobten Schweißeinstellungen im Hinblick auf die zuvor erhaltenen Schweißraupen nicht reproduzierbar. Die Temperatur der vorherigen Schweißlage bestimmt das Erscheinungsbild der aktuellen Schweißnaht.



Abbildung 11: Schweißversuch mit dem Ziel die Breite der Schweißraupe zu erhöhen durch Erhöhung der Stromstärke

Das Problem besteht darin, dass derzeit keine Daten über die Temperatur jeder geschweißten Lage vorliegen, was bedeutet, dass nicht bekannt ist, welche Ausgangssituation für jede geschweißte Lage gegeben ist. Erst während des laufenden Prozesses wird absehbar, wie die geschweißte Lage aussehen wird. Entweder verläuft der Lichtbogen ruhig und gleichmäßig, und es entsteht eine saubere Schweißraupe aufgrund der evaluierten Parameter, oder aber der Lichtbogen verläuft unruhig, es bilden sich viele Spritzer, und die Schweißnaht sieht ähnlich aus wie in Abbildung 11 dargestellt. Das bedeutet, dass trotz gleicher eingestellter Schweißparameter unterschiedliche Ausgangstemperaturen vorliegen und dementsprechend verschiedene Schweißnähte geschweißt werden.

Um den Einfluss und das Verhalten des Fülldrahts beim Schweißen besser zu verstehen, wurde beschlossen, eine Hochgeschwindigkeitsaufnahme durchzuführen. Die Hochgeschwindigkeitsaufnahme beim Schweißen wird häufig zur Optimierung und Verbesserung des Schweißverfahrens eingesetzt. Sie ermöglicht es, den Schweißprozess im Detail zu beobachten und zu analysieren, um mögliche Schwachstellen oder Probleme zu identifizieren.

Durch den Einsatz von Hochgeschwindigkeitskamera können beispielsweise die Schweißgeschwindigkeit, der Lichtbogen und die Schmelzbadformung besser kontrolliert und optimiert werden, um eine höhere Qualität und Effizienz des Schweißprozesses zu erreichen. Zudem können Fehler oder Defekte im Schweißgut durch die Analyse der Aufnahmen schneller und genauer erkannt werden.

Die Wahl der Kamera ist von entscheidender Bedeutung, da sie in der Lage sein muss, eine ausreichend hohe Bildrate aufzunehmen, um die schnellen Bewegungen und Veränderungen im Schweißprozess zu erfassen. In diesem Fall wurde die FASTCAM SA5

Model 775K-M2 Hochgeschwindigkeitskamera der Firma Photron ausgewählt. Es ist wichtig, die Kamera so zu positionieren, dass sie die relevanten Bereiche des Schweißprozesses erfasst. Die genaue Positionierung hängt von den spezifischen Anforderungen des Schweißprozesses ab. Die Positionierung der Kamera und ihre Vorbereitung zur Schweißprozessaufnahme werden in Abbildung 12 und Abbildung 13 dargestellt.

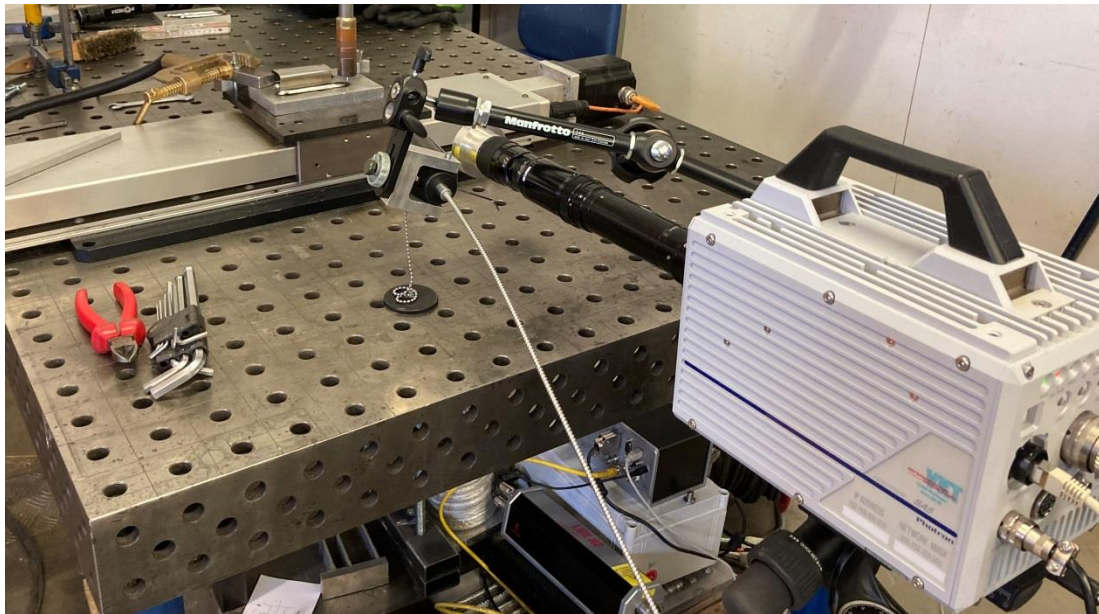


Abbildung 12: Hochgeschwindigkeitskamera (1)

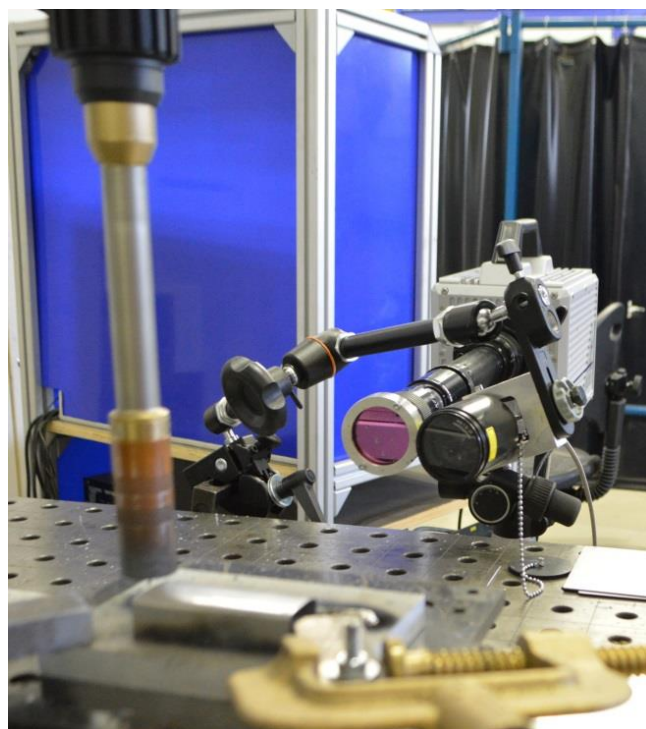


Abbildung 13: Hochgeschwindigkeitskamera (2)

Nach der Vorbereitung müssen der Roboterarm und die Schweißmaschine vorbereitet werden, um sicherzustellen, dass die Aufnahme unter optimalen Bedingungen erfolgt. Während der Aufnahme müssen die Schweißbedingungen konstant gehalten werden, um die Vergleichbarkeit der Aufnahmen zu gewährleisten. Es werden die bereits untersuchten Schweißparameter für den AlSi5-Massivdraht sowie für den Al99,7 + CNS verwendet. Nach Abschluss des Schweißprozesses erfolgt eine Analyse der Aufnahme, um potenzielle Schwachstellen oder Probleme im Schweißprozess zu identifizieren. Durch das Schweißen mit dem Massivdraht wurde ein stabiler Lichtbogen erzeugt, der zu einer kontinuierlichen und gleichmäßigen Schweißnaht führte. Die gewählten Schweißparameter waren passend und konnten reproduziert werden. Die entstandene Schweißnaht wurde in Abbildung 14 dokumentiert.



Abbildung 14: AlSi5-Schweißnaht

Es wird sichergestellt, dass der Prozess stabil verläuft und keine Abweichungen auftreten, indem die Aufnahme durchgeführt wird. Der Schmelztropfen bildet sich in regelmäßigen Abständen und trifft den Nahtbereich ohne seitliche Abweichungen. Abbildung 15 zeigt die Beständigkeit der Tropfenbildung sowie des Lichtbogens während der Hochgeschwindigkeitsaufnahme.



Abbildung 15: Hochgeschwindigkeitsaufnahme AlSi5-Massivdraht

AP 1.2: Einfluss von Al-Fülldrähten (AluCore) auf die Komponentenfertigung

Der nahtlose AluCore-Fülldraht wurde mit einer resultierenden chemischen Zusammensetzung von AlSi8+C und einer begrenzten Länge von etwa 80 Metern zur Verfügung gestellt. Eine Schweißparameterstudie wurde durchgeführt, um mehrere Lagen übereinander zu schweißen, wobei nur im zehnten Versuch dieses Ziel erreicht wurde. Die begrenzte Länge des Drahtes hat bisher die Fertigung komplexerer Bauteile verhindert. Dennoch konnte gezeigt werden, dass der AluCore-Fülldraht schweißbar ist und mit geeigneten Schweißparametern verwendet werden kann (Abbildung 16).

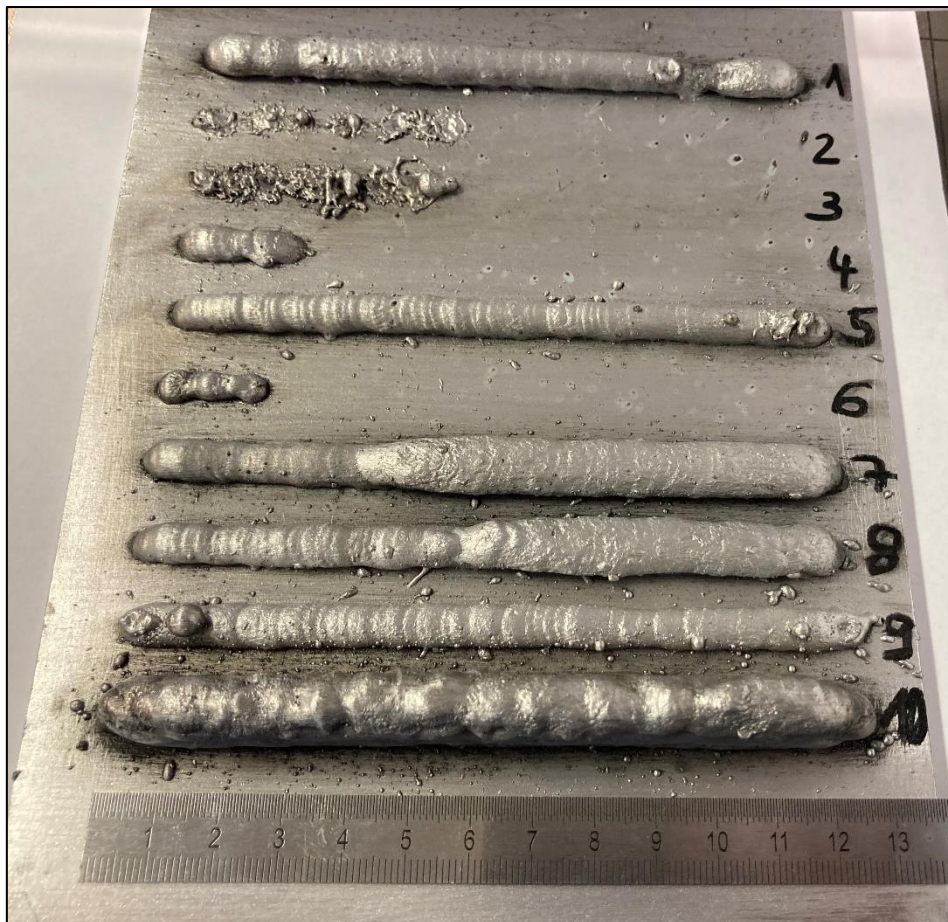


Abbildung 16: Erste Schweißparametersuche AluCore

Beim Schweißen mit Fülldraht erwies sich der Prozess als instabil, wobei die Naht sich ungleichmäßig bildete und verschiedene Probleme auftraten, darunter Spritzer, eine unregelmäßige Schweißnahtgeometrie und Schmauchbildung an verschiedenen Stellen. Abbildung 17 zeigt die entstandenen Schweißnähte, wobei die Naht in der Mitte vom Schmauch gereinigt wurde, um die Fehlerstellen besser erkennen zu können.



Abbildung 17: Al99,7-Schweißnaht

Die Hochgeschwindigkeitsaufnahme ermöglicht die Erklärung der Unregelmäßigkeiten und Instabilitäten im Schweißprozess. Die Tropfenbildung variiert ständig in Form und Menge des enthaltenen Werkstoffs. An einigen Stellen bildet sich der Tropfen aus dem Mantel und dem gefüllten Pulver, während meistens das Pulver aus dem Draht verdampft und sich als Spritzer oder Schmauch in der Umgebung der Schweißzone absetzt. Der Draht schmilzt nicht gleichmäßig ab, was zu Lücken im Draht führt und das Verdampfen des Pulvers begünstigt. Abbildung 18 illustriert diesen beschriebenen Schweißfehler.

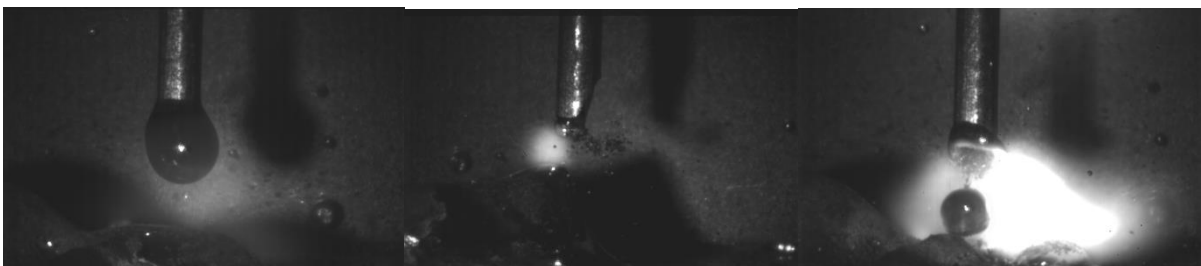


Abbildung 18: Hochgeschwindigkeitsaufnahme Al99,7-Fülldraht

Das Verdampfen und unvollständige Verschmelzen des Pulvers führten dazu, dass die Tropfen abgelenkt wurden und der Draht das Schmelzbad an verschiedenen Stellen traf. Dadurch konnte der Prozess keine regelmäßigen Tropfen bilden, und an einigen

Stellen verdampfte der Zusatzwerkstoff in Form von Spritzern. Dies war die Ursache für die Instabilität des Lichtbogens und die abweichende Schweißnahtgeometrie. Abbildung 19 zeigt die Ablenkungen der Zusatzwerkstofftropfen und die Unregelmäßigkeiten während der Hochgeschwindigkeitsaufnahme.

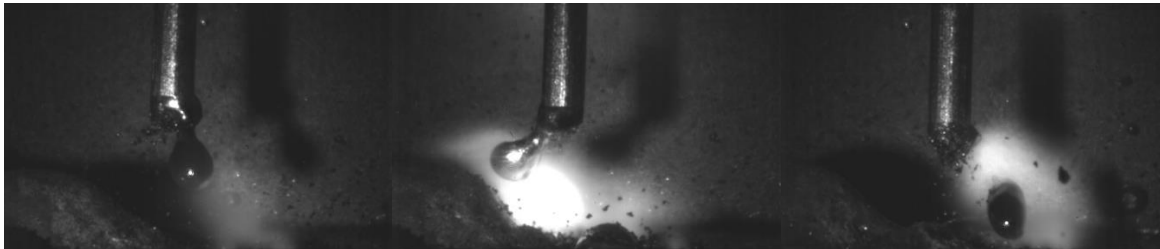


Abbildung 19: Ablenkung der Tropfen Fülldraht

Es gibt Unregelmäßigkeiten in der Drahtherstellung, möglicherweise aufgrund einer ungleichmäßigen Verteilung des Pulvers oder von leeren Stellen im nahtlosen Draht. Eine weitere mögliche Ursache ist die unvollständige Reinigung des Drahtes nach dem Ziehprozess.

AP 1.3: Bauteilorientierte Prozessauslegung für nanoverstärkte Al-Fülldrähte

Bevor der Geschwindigkeitsaufnahme wurden erste Schweißversuche mit einem Alu-NanoCore Fülldraht erfolgreich durchgeführt, da dieser nun verfügbar ist. Die Abbildung 20 zeigt diese Versuche. Es wurde festgestellt, dass der neu entwickelte Fülldraht schweißbar ist und es möglich war, mehrere Schweißlagen übereinander zu schweißen. Jedoch war ein Verbesserung der Drahtzuführung erforderlich, da es zu Schweißabbrüchen kam.



Abbildung 20: Erste Schweißparametersuche AluNanoCore

In Abbildung 21 ist zu sehen, dass zwei Lagen übereinander geschweißt wurden, jedoch kam es in der Mitte zu einem Schweißabbruch. Daher wurde eine visuelle Prüfung im Inneren der Schweißnaht für eine einlagige und eine zweilagige Schweißung durchgeführt. Es ist deutlich erkennbar, dass in der oberen Lage mehr Poren zu finden sind. Dies lässt sich durch die zusätzliche Wärmeeinbringung der zweiten Lage erklären. Das Schweißgut samt Poren wird erneut erhitzt und schwimmt nach oben, in diesem Fall in die zweite Lage. Dort erstarrt das Schweißgut, bevor die Poren entgasen können, und lagert sich demzufolge dort ab.



Abbildung 21: Visuelle Prüfung der Schweißnaht mit ANC

In der nächsten Projektphase wurde der neue AluNanoCore-Fülldraht (Abbildung 22) erhalten, der zwar in seiner Länge begrenzt, aber für die ersten Versuche ausreichend war. Die Montage des Drahtes an der Schweißanlage verlief problemlos, ohne dass er brach. Abbildung 23 zeigt den neuen Draht an der Schweißmaschine, und in Abbildung 24 sind die Förderrollen am Schweißbrenner zu sehen.



Abbildung 22: Neuer Fülldraht



Abbildung 23: Fülldraht montiert an der Schweißmaschine



Abbildung 24: Fülldraht montiert am Schweißbrenner

AP 1.4: Fertigungsstrategien für 3D-Komponenten

Nach der Charakterisierung der nanoverstärkten Fülldrähte mittels verschiedener Untersuchungen und Versuche sollten Fertigungsstrategien für 3D-Komponenten entwickelt werden. Die Fertigung verschiedener Strukturen mittels des Massivdrahts AlSi5 hat viele Informationen über das Verhalten von Aluminium bei additiver Fertigung geliefert. Der Massivdraht trägt dazu bei, das grundlegende Verhalten des Aluminiums zu verstehen. Dies reicht jedoch nicht aus für die additive Fertigung mit nanoverstärkten Fülldrähten. Die Nahtabmessungen sowie das Verhalten des Schweißprozesses ändern sich in Abhängigkeit vom verwendeten Draht und den Leistungs- bzw. Fertigungsparametern. Die Schweißrichtung, der Start- und Endpunkt sowie die resultierenden Erhöhungen gehören zur Fertigungsstrategie. Die für die Fertigung vorgesehenen 3D-Komponenten sollten zunächst modelliert und für die additive Fertigung durch Slicing vorbereitet werden. Die Start- und Endpunkte müssen für jede Schicht festgelegt werden. Die ersten Raupen bzw. Schichten sollten eine feste und ausreichende Verbindung mit der Substratplatte gewährleisten. Daher wird der Drahtvorschub je nach Schicht angepasst. Die Schweißanlage bietet verschiedene Schweißparameter, um den Prozess stabiler zu gestalten. In Tabelle 1 sind die entwickelten Leistungsparameter für den Bau der ersten Wand mittels additiver Fertigung dargestellt. Die Parameter wurden nicht vollständig in der Tabelle 1 aufgeführt, da es viele Feinheiten gibt, die die Wärmeenergie nicht wesentlich beeinflussen, aber die Nahtqualität verbessern können.

Tabelle 1: Schweißparameter Fülldraht AlMg1+Al+CNS

| Schweißlage | Startstrom[%] | Endstrom[%] | Kontaktdüsenabstand[mm] | Schutzgasdurchfluss[L/min] | Schweißgeschwindigkeit[cm/min] | Drahtvorschub[m/min] |
|-------------|---------------|-------------|-------------------------|----------------------------|--------------------------------|----------------------|
| 1 | 110 | 95 | 16 | 16 | 32,55 | 9 |
| 2 | 110 | 95 | 16 | 16 | 32,55 | 9 |
| 3 | 110 | 95 | 16 | 16 | 32,55 | 8,5 |
| 4 | 110 | 95 | 16 | 16 | 32,55 | 8,5 |
| 5 | 110 | 95 | 16 | 16 | 32,55 | 8 |
| 6 | 110 | 95 | 16 | 16 | 32,55 | 8 |
| 7 | 110 | 95 | 16 | 16 | 32,55 | 7,5 |
| 8 | 110 | 95 | 16 | 16 | 32,55 | 7,5 |
| 9 | 110 | 95 | 16 | 16 | 32,55 | 7 |
| 10 | 110 | 95 | 16 | 16 | 32,55 | 7 |
| 11 | 110 | 95 | 16 | 16 | 32,55 | 6,3 |
| 12 | 110 | 95 | 16 | 16 | 32,55 | 6,3 |
| 13 | 110 | 95 | 16 | 16 | 32,55 | 6 |
| 14 | 110 | 95 | 16 | 16 | 32,55 | 6 |
| 15 | 110 | 95 | 16 | 16 | 32,55 | 5,5 |

Der verwendete Zusatzwerkstoff ist ein nanoverstärkter Fülldraht mit der Zusammensetzung AlMg1 + Al + CNS und einem Füllgrad von 27%. Der Durchmesser des Fülldrahts beträgt 1,6 mm. Die verwendete Schweißstromquelle ist die CMT-mix (4/5) Kennlinie von Fronius für den Massivdraht AlSi5 mit einem Durchmesser von 1,2 mm. Der empfohlene Kontaktdüsenabstand liegt zwischen 16 und 18 mm. Eine Z-Verschiebung von 1,8 mm sollte nach jeder Raupenschicht am Roboter eingestellt werden. Um eine Wanddicke von 10 mm zu erreichen, wird empfohlen, mit einer Schweißgeschwindigkeit von 5,5 m/min fortzufahren. Die resultierende Wand ist in der Abbildung 25 dargestellt.



Abbildung 25: Mit Fülldraht additiv gefertigte Wand

AP 2.1: Validierung an einem 3D-Demonstrator

Während dieses Arbeitspakets war die Aufgabe des KSC die Validierung der Bau- und Schweißfähigkeit des Prozesses mittels verstärkter Fülldrähte. Trotz verschiedener Verzögerungen, beispielsweise aufgrund der Corona-Pandemie oder langer Lieferzeiten für Fülldrähte, die zunächst von der BTU untersucht, weiterbearbeitet und optimiert werden mussten, konnten wir in Zusammenarbeit mit der BTU die Eigenschaften und Voraussetzungen der verstärkten Fülldrähte ermitteln und Schritt für Schritt optimieren. Die BTU stellte uns schließlich einen Draht zur Verfügung, der die erforderlichen Eigenschaften und die Fähigkeit zum Schweißen aufwies. Nach zahlreichen Versuchen konnten die Drahteigenschaften optimiert werden. Dabei war nicht nur die Effizienz des Fülldrahts wichtig, sondern auch die Schweißparameter und -strategie, die im Arbeitspaket 1 entwickelt wurden.

Es wurden zwei Demonstratoren additiv gefertigt, wobei der erste mit Massivdraht AlSi5 und der zweite mit dem nanoverstärkten Fülldraht als Zusatzwerkstoff hergestellt wurde. Die Fertigung des ersten Demonstrators mit Massivdraht lieferte uns wertvolle Informationen und diente als Vorbereitung für den zweiten Demonstrator.

Der erste Demonstrator ist komplex gestaltet. Er besitzt eine T-Form mit einer Wanddicke von 18 mm und verjüngt sich nach oben. Die Höhe beträgt 85 mm. Die Wandbreite variiert von 220 mm (ganz unten, erste Raupenschicht) bis zu 110 mm (ganz

oben, letzte Raupenschicht). Eine Abbildung des Demonstrators ist in Abbildung 26 zu sehen.

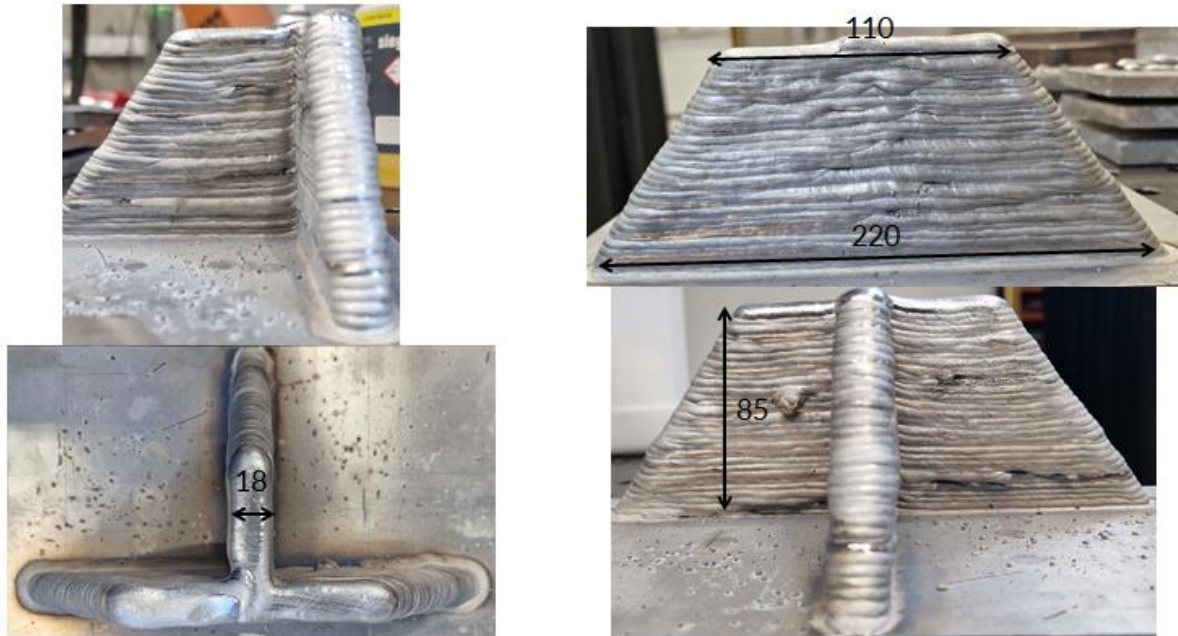


Abbildung 26: Demonstrator aus Massivdraht

Der zweite, nanoverstärkte Demonstrator in Anlehnung an Versteifungsstreben hat eine sehr gute Form aufgewiesen. Ähnlich wie der erste Demonstrator ist er komplex und hat die Form eines Kreuzes. Es traten sehr wenige Spritzer auf, was während des Schweißens ganz normal ist, und es gab keine Anzeichen von Schmutz vom Schmauch. Dies deutet darauf hin, dass die Schweißparameter und die geplante Schweißstrategie ein Leichtbaupotenzial aufweisen.

Die Schweißparameter und die resultierenden Nähte wurden mehrfach untersucht, um die bestmögliche Schweißenergie, Schweißdimensionen und Schweißatmosphäre festzulegen. Der Demonstrator ist in der Abbildung 27 zu sehen.

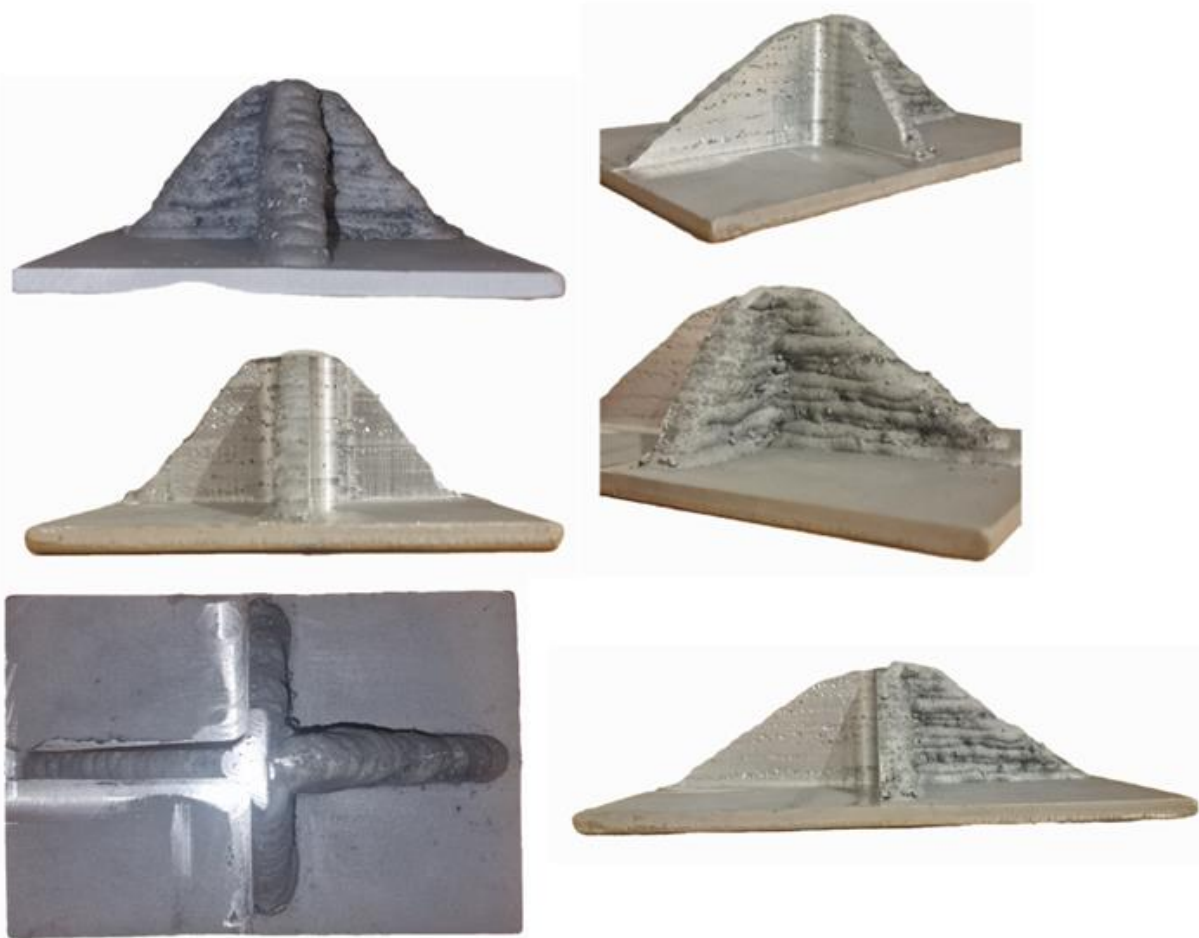


Abbildung 27: Demonstrator aus AluNanoCore-Fülldraht

Die verschiedenen Versuche wurden sorgfältig dokumentiert und analysiert. Auf Basis dieser Untersuchungen wurden Schlussfolgerungen gezogen, die die Schweißschritte betreffen, die für die Herstellung des Demonstrators verwendet wurden.

AP 2.2: Bewertung und Demonstration des Leichtbaupotenzials

Das Leichtbaupotenzial kann durch verschiedene Aspekte und Untersuchungen realisiert werden. Ein wichtiger Faktor ist das Gewicht, das eine primäre Eigenschaft des Leichtbaus darstellt. Durch die Verwendung der Parameter des 1,2-mm-Massivdrahts für die Fertigung mit dem 1,6-mm-Fülldraht wird das Verhältnis von der benötigten Energie in Abhängigkeit vom Zusatzwerkstoff erhöht. Folglich wird die gleiche Energiemenge für einen größeren Bauteil eingebracht, indem Fülldrähte anstelle von Massivdrähten verwendet werden. Weniger Energie bedeutet auch weniger CO₂-Emissionen. Der nanoverstärkte Fülldraht zeigt sein Leichtbaupotenzial durch seinen Grundwerkstoff. Die Fülldrähte bestehen aus Aluminium, einem der drei bekanntesten Leichtmetalle. Trotz der Porosität der Proben zeigten Zug- und Härteversuche verbesserte mechanische Eigenschaften des aufgetragenen Metalls bei Verwendung von mit CNS

modifiziertem Al-Fülldraht im Vergleich zu Al99,7- sowie AlSi5-Massivdrähten. Das heißt, bei geringerem Gewicht des Demonstrators wurden bessere mechanische Eigenschaften erreicht. Darin liegt das Leichtgewichtspotenzial des entwickelten modifizierten Fülldrahts.

AP 3: Werkstoff- und Bauteilcharakterisierung

Das Ziel dieses Arbeitspakets besteht darin, die neuartigen Fülldrähte mit konventionellen Bauteilen, die mit Massivdraht geschweißt wurden, vergleichen zu können. Zunächst wurden die Bauteile, wie in "AP 1.1: Referenzuntersuchungen mit konventionellen Al-Massivdrähten" beschrieben, untersucht. Hierbei wurden metallografische Schliffproben angefertigt, um den Porenanteil zu bestimmen. Ein Beispiel für eine solche Schliffprobe ist in Abbildung 28 dargestellt.

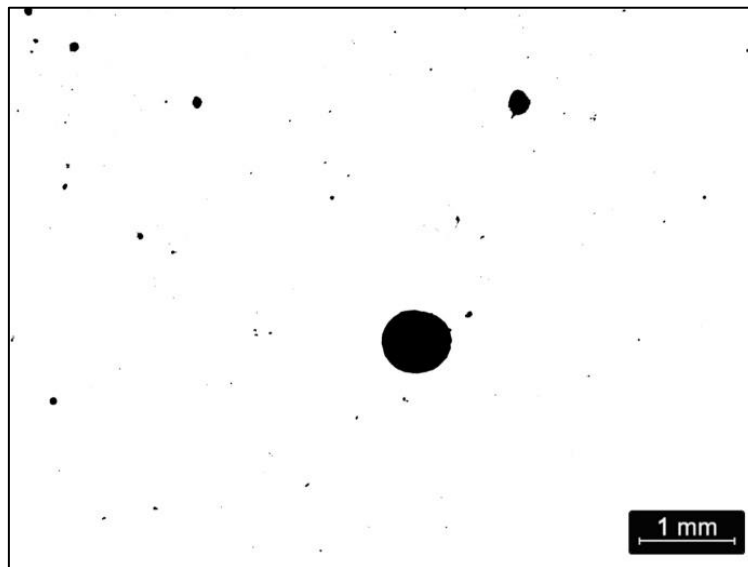
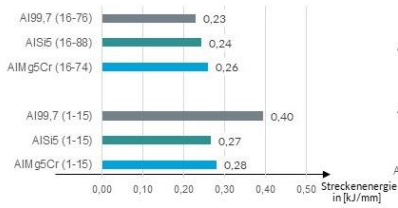


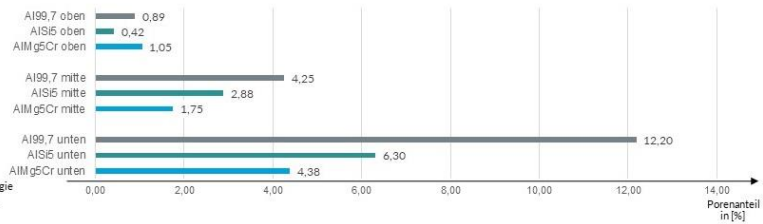
Abbildung 28: Schliffprobe zur Bestimmung des Porenanteils

Anhand dieser Schliffbilder wurde der Porenanteil bestimmt und mit der geschweißten Streckenenergie verglichen. Auf der nachfolgenden Seite sind die Diagramme der verwendeten Streckenenergie der geschweißten Bauteile und der Porenanteil gegenübergestellt. Die Diagramme zeigen, dass in den unteren Lagen mehr Wärme eingebracht wurde und sich dort mehr Poren befinden. Je höher das Bauteil wird, desto geringer wird der Porenanteil, siehe Abbildung 29.

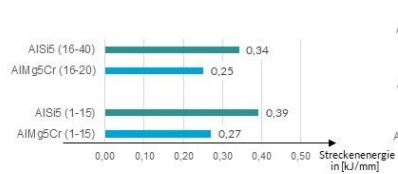
Streckenenergie dünnwandige Bauteile



Porenanteil dünnwandige Bauteile



Streckenenergie dickwandige Bauteile



Porenanteil dickwandige Bauteile

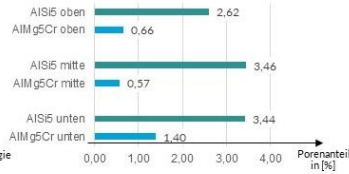


Abbildung 29: Porenanalyse

Neben der Bestimmung des Porenanteils wurden Zugversuche durchgeführt. Auf den folgenden Abbildungen sind die Ergebnisse der Zugversuche für die Bauteile mit AISi5-Massivdraht dargestellt. Linksseitig sind die Spannungsdehnungskurven zu sehen. In der Mitte sind Aufnahmen der Bruchfläche abgebildet, und auf der rechten Seite sind Balkendiagramme mit den Ergebnissen der Zugfestigkeit, Dehngrenze und Dehnung dargestellt.

AlSi5 dünnwandig Zugversuche

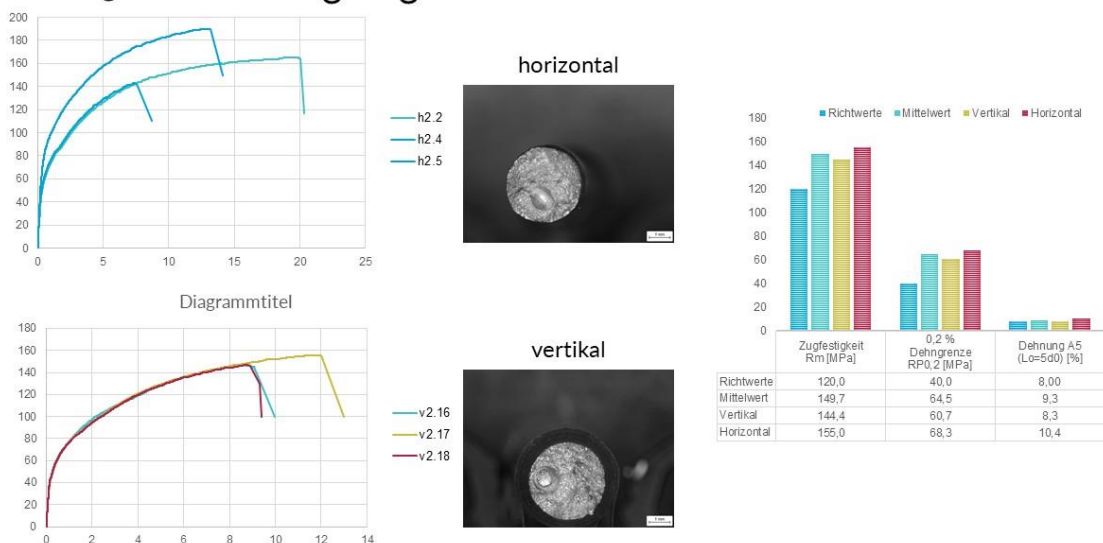


Abbildung 30: Zugversuche AISi5 dünnwandig

Die Ergebnisse zeigen, dass die Richtwerte für die Schweißverbindungen mit den WAAM-hergestellten Bauteilen übertroffen werden.

AlSi5 dickwandig Zugversuche

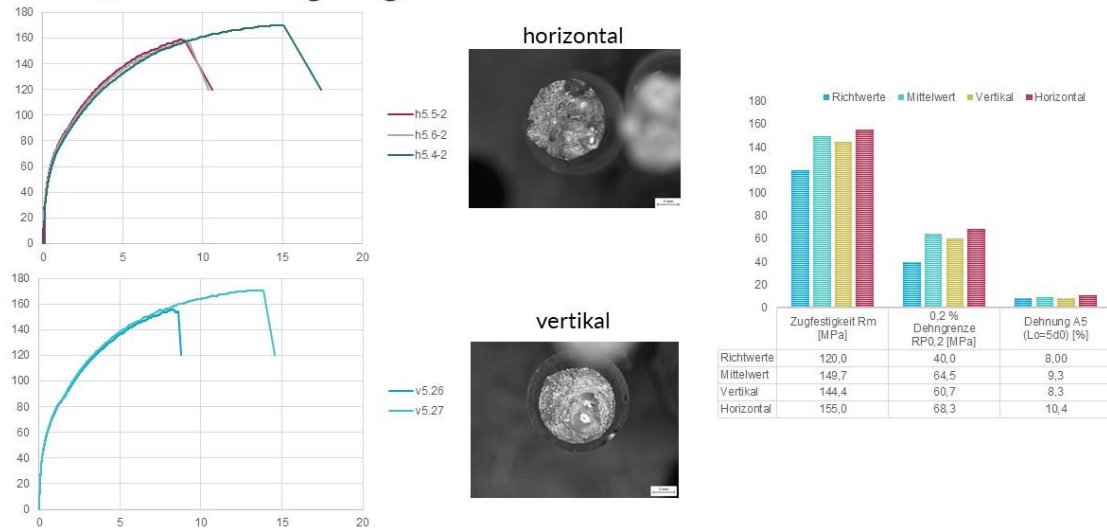


Abbildung 31: Zugversuche AlSi5 dickwandig

Die werkstofftechnologischen Untersuchungen wurden umfassend durchgeführt. Die Entnahme der Schliffproben ist in Abbildung 32 dargestellt.

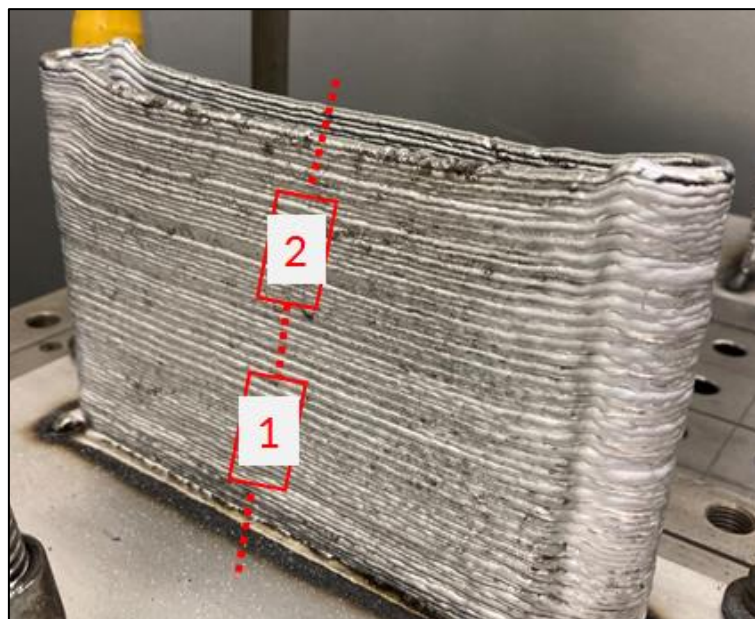


Abbildung 32: Entnahme Makroschliffe

In den Abbildungen 30 und 31 sind zwei Makroschliffe exemplarisch dargestellt. Es ist zu erkennen, dass im unteren Bereich eine höhere Anzahl an Poren vorliegt als im oberen Bereich der additiv gefertigten Probe.

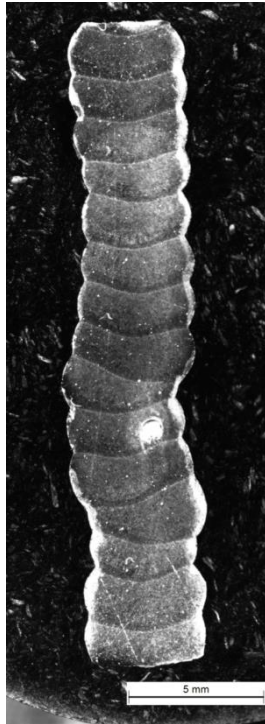


Abbildung 34: Entnahme Makroschliff (Oben)

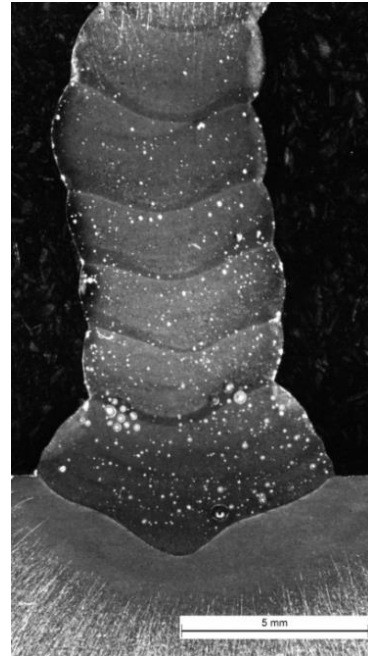


Abbildung 33: Entnahme Makroschliff (Unten)

Des Weiteren wurden Härtemessungen in der Mitte der jeweiligen Probe in einem Abstand von 5 mm durchgeführt. Die ermittelten Härtemessungen ergaben Härtewerte in einem Bereich von 54,4 bis 68 HV 0,1.

III. Teil III: Erfolgskontrollbericht

1. Wissenschaftlich-technische Ergebnisse und Erfahrungen des Vorhabens

Wie in Teil II beschrieben, konnte das Projekt erfolgreich abgeschlossen werden durch die Entwicklung effizient schweißbarer, hochfester nanoverstärkter Aluminium-Fülldrähte. Die Anlagen- und Prozessqualifizierung wurde entlang des im Projektablauf dargestellten Beispiels eines realen Prototyps durchgeführt. Hierfür wurden in Zusammenarbeit mit der BTU Cottbus - Senftenberg und den Projektpartnern aus der Industrie, die die Fülldrähte hergestellt haben, relativ komplexe Strukturen additiv gefertigt.

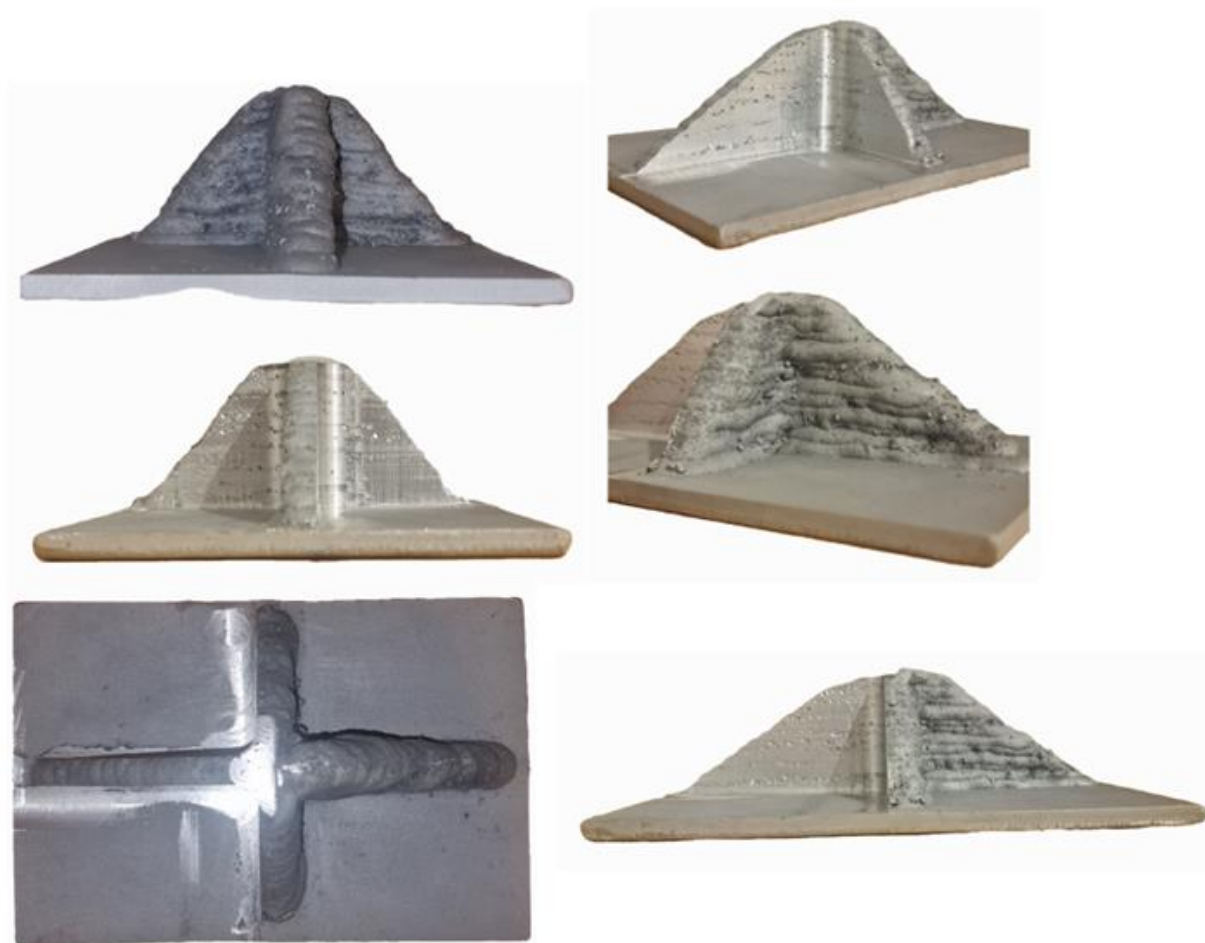


Abbildung 35: Demonstrator

2. Fortschreitung/Stellungnahme zum Verwertungsplan der Ergebnisse

2.1. Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen

Im Rahmen des Projekts wurde keine Schutzrechtsanmeldung durchgeführt, und es waren auch keine Schutzrechte erforderlich. Der von KSC entwickelte additiv Ferti-gungsprozess für schweißbare, hochfeste nanoverstärkte Aluminiumfülldrähte ermöglicht es dem Unternehmen, sein Leistungsportfolio mit Blick auf wirtschaftliche und wissenschaftliche Erfolgsaussichten zu erweitern.

2.2. Wirtschaftliche Erfolgsaussichten

Das Fertigungsportfolio von KSC umfasst das hochpräzise Schweißen von Komponenten im Rohrleitungs-, Stahl- und Anlagenbau sowie im Bereich der Thermo- und Elektrotechnik, beispielsweise zur Umsetzung hocheffizienter Wärmeübertragungssysteme. Dies beinhaltet die Herstellung und Lieferung von kompletten Baugruppen und einzelnen Unterkomponenten. Ein strategisches Ziel des Unternehmens ist es, sich sowohl mit neuen Produkten wie maßgeschneiderten Konsolen, Versteifungen, Ersatz- und Reparaturteilen für Anwendungen in der additiven Fertigung als auch in neuen Märkten zu positionieren. Diese Diversifizierungsstrategie birgt hohes Wachstumspotenzial, erfordert jedoch auch innovative Produkte und Produktionstechnologien.

Die Kompetenz im Produktdesign wird durch die Einführung schweißbarer, hochfester nanoverstärkter Aluminiumfülldrähte erweitert, um zukünftig selbst entwickelte Produkte mit verbessertem Engineering und verkürzter Fertigungszeit herstellen und anbieten zu können. Die Expertise im Umgang mit allen modernen Lichtbogenprozessen bei der KSC Anlagenbau GmbH bietet ideale Voraussetzungen dafür.

Während der Projektlaufzeit wurde eine Analyse des Anwendungspotenzials sowie eine Überarbeitung des strategischen Produktportfolios der beteiligten Unternehmen durchgeführt. Die Auswahl der Partner war nicht nur für den erfolgreichen Abschluss des Projekts entscheidend, sondern ermöglicht auch eine enge Verknüpfung von Forschungseinrichtungen und Unternehmen. Kooperationen und die damit verbundenen wirtschaftlichen Effekte unterstützen eine langfristige Zusammenarbeit in diesem anspruchsvollen Forschungsgebiet.

2.3. Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten

KSC strebt mit dem geplanten Projekt eine verstärkte Ausrichtung des Unternehmens auf das additive Fertigen mit Fülldrähten an. Diese Fertigungstechnologie bietet das Potenzial, eine Vielzahl von Komponenten im Kerngeschäft des Anlagenbaus zu substituieren. Ein zentraler Gedanke dabei ist ein mittel- bis langfristig orientierter, konsequenter funktionsintegrierter Leichtbau für Komponenten der dezentralen Energietechnik. Die geplanten Demonstratoren sollen die Machbarkeit und das weitere Potenzial dieses Ansatzes verdeutlichen.

Die Erweiterung der unternehmensinternen FuE-Abteilung sowie die fortlaufende enge Kooperation mit der BTU Cottbus - Senftenberg zielen darauf ab, langfristig produktivere Fertigungen mit möglichst vollständigen und innovativen Wertschöpfungsketten zu ermöglichen. Dies soll dazu beitragen, die Sichtbarkeit von KSC als qualitativ hochwertigen Zulieferer zu erhöhen.

2.4. Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Die BTU Cottbus - Senftenberg unterstützt das Projektkonsortium aktiv bei der Entwicklung einer Patentstrategie, um die technischen Forschungsergebnisse angemessen zu schützen und zu verwerten. Die untersuchten Fertigungstechnologien bieten im Vergleich zu anderen Verfahren eine Reihe von Vorteilen, insbesondere für KMU, da ihre Implementierung einfacher ist. Das wirtschaftliche Potenzial ist enorm, vor allem im Bereich der Serienintegration.

Die Umsetzung der Projektergebnisse in das Produktportfolio von KSC wird die Marktposition des Unternehmens stärken und es ermöglichen, den zukünftigen Herausforderungen zu begegnen. Es ist geplant, die neu entwickelten Technologien durch öffentlichkeitswirksame Maßnahmen wie eine gemeinsame Präsentation der Projektergebnisse mit der BTU Cottbus - Senftenberg auf der InnoTrans 2024 zu bewerben. Dadurch sollen alternative Märkte wie die Energietechnik erschlossen werden.

3. Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben

Im Rahmen dieser Untersuchungen wurden keine Arbeiten identifiziert, die zu keiner Lösung geführt haben. Alle durchgeführten Analysen und Tests haben zu aussagekräftigen Ergebnissen geführt, die unsere Bewertung des Fertigungspotenzials unterstützen.

4. Angaben über die Einhaltung der Ausgaben- und der Zeitplanung

Bezugnehmend auf die Anfrage nach einer kostenneutralen Verlängerung sowie dem entsprechenden Änderungsbescheid wurde das Vorhaben über den ursprünglichen Zeitrahmen hinaus verlängert. Während dieser zusätzlichen Periode wurde der finanzielle Ausgabenplan eingehalten.

Ort

Datum

Unterschrift