

# SCHLUSSBERICHT

zum Innovationsvorhaben der HEGGEMANN AG

„REGULUS“ – Ressourceneffiziente Fertigung von großvolumigen Luftfahrt-Strukturelementen“

Teilprojekt:

Entwicklung, Qualifizierung und Realisierung der vernetzten Prozesskette unter Berücksichtigung der luftfahrttechnischen Qualitätsstandards bei idealisierten industriellen Einsatzbedingungen

**Förderkennzeichen: 20W1709B**

im Rahmen des 3. Aufruf des Luftfahrtforschungsprogramms V (LuFo V-3)

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Laufzeit des Vorhabens: 01.01.2018 – 30.06.2022

Zuwendungsempfänger:

**HEGGEMANN AG**

Zeppelinring 1-6

33142 Büren

*Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor/bei den Autoren.*

## Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	1
1. Aufgabenstellung und Projektziele.....	2
2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde.....	4
3. Planung und Ablauf des Vorhabens.....	5
4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde.....	7
4.1 Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden.....	8
4.2 Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste.....	9
5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	11
<b>Eingehende Darstellung der Projektergebnisse.....</b>	<b>12</b>
6. Verwendung der Zuwendung und Darstellung der erzielten Ergebnisse im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele.....	12
7. Zusammenfassung der Projektergebnisse.....	49
8. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises.....	52
9. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	53
10. Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere bzgl. möglicher Energie- und Materialeinsparungen.....	54
11. Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen.....	55
12. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr.11.....	55
Anhang.....	56

## 1. Aufgabenstellung und Projektziele

Der REGULUS Projektverbund hat sich der Aufgabe gestellt, eine vernetzte und damit vollumfänglich digital darstellbare Fertigungsprozesskette für eine additive und spanende Bearbeitung von Luftfahrt-Titanstrukturen zu entwickeln. Mittels eines lichtbogenbasierten Schweißverfahrens, dem sogenannten Wire & Arc Additive Manufacturing (WAAM) sollten die endkonturnahen Titanhalbzeuge materialeffizient in einem stabilen Prozess hergestellt werden, um bei dem anschließenden Zerspanungsprozess weniger Titanmaterial aufwendig zerspanen zu müssen.

Fokus der Arbeitsumfänge von HEGGEMANN als etablierter Luftfahrt- und Schweißfachbetrieb lag dabei im Projektverbund auf der Einhaltung der material- und prozesstechnischen Qualitätsstandards der kommerziellen Luftfahrtindustrie. Ebenso war der Aufbau und Erprobung der vernetzten WAAM-Fertigungszelle inkl. der erforderlichen Hard- und Software zur Prozessabsicherung ein weiterer inhaltlicher Schwerpunkt. Durch die Verbesserung des Werkstoffausnutzungsgrads im Vergleich zu dem „Zerspanen aus dem Vollen“ sollen die Fertigungskosten für entsprechende Titanstrukturen deutlich und messbar gesenkt werden. Für das Gesamtvorhaben wurden bei Projektbeginn die folgenden acht übergeordneten Ziele gemeinsam im Projektverbund definiert und den jeweiligen Projektpartnern zugeordnet. Für das Teilprojekt von HEGGEMANN ergeben sich demnach die Verantwortlichkeiten für die Erreichung der Ziele 1 und 2. Bei den weiteren Zielen unterstützt HEGGEMANN die Projektpartner gemäß Arbeits- und Meilensteinplan bei der Erreichung der formulierten Zielstellungen.

1. Der übergeordnete Anspruch des Vorhabens ist es, eine ortsübergreifende und digital vernetzte Fertigungskette aufzubauen, welche die luftfahrtüblichen Qualitätsstandards erfüllt.
2. Der Funktionsnachweis der lichtbogenbasierten additiven Fertigung wurde bereits erbracht. Am Ende des Vorhabens soll ein Realbauteil mit dem Technologiereifegrad 8 (Qualifiziertes System mit Nachweis der Funktionstüchtigkeit im Einsatzbereich) gefertigt und damit ein deutlicher Fortschritt zum aktuellen Stand der Technik erzielt werden.
3. Durch die angestrebte Fertigungsprozesskette soll der Werkstoffausnutzungsgrad von derzeit 25:1 bei der rein spanenden Fertigung auf das Verhältnis 3:1 gesenkt werden.
4. Eine durchgängige und effiziente Prozessplanung soll sichergestellt werden, um die Wirtschaftlichkeit durch einen stark reduzierten Einsatz von Titanwerkstoffen zu erhöhen. Zudem soll dadurch eine Zeitersparnis in der Fertigung von 80 % erzielt werden.
5. In der Luftfahrt herrschen aufgrund der schwerwiegenden Folgen eines Bauteilversagens hohe Qualitäts- und Sicherheitsstandards. Bauteile, die in REGULUS gefertigten Realbauteile sollen den hohen Anforderungen hinsichtlich Ermüdungs- und Betriebsfestigkeit durch die Identifikation qualitätssteigernder Maßnahmen gerecht werden. Die zu erreichenden Qualitätsziele werden nach Projektbeginn festgelegt.
6. Infolge einer adäquaten Prozessführung soll die Ausschussquote durch zu hohe Eigenspannungen oder durch Verzug bei der additiven Fertigung geringer als 15 % sein. Zudem gilt es sicherzustellen, dass die von den Luftfahrt-OEM geforderte Maßhaltigkeit nach der spanenden Bearbeitung der Bauteile gegeben ist.

7. In der Luftfahrtindustrie werden eine lückenlose Rückverfolgbarkeit der Bauteile und eine Dokumentation aller Fertigungsabläufe gefordert. Dies soll für die ortsübergreifende Fertigungsprozesskette effizient und revisionssicher gestaltet werden.

Der übergeordnete Lösungsansatz besteht in der Etablierung einer ortsübergreifenden und digital vernetzten Fertigungsprozesskette. In dieser soll die lichtbogenbasierte additive Fertigung eines endkonturnahen Halbzeugs mit einer prozessintegrierten oder nachgelagerten thermischen Behandlung sowie der anschließenden spanenden Bearbeitung kombiniert und digital vollständig abgebildet werden.

## 2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das HEGGEMANN Teilprojekt wurde am einzigen Standort der HEGGEMANN AG, am Airport Paderborn-Lippstadt in Büren durchgeführt.

1962 als „Luftfahrttechnischer Betrieb“ gegründet hat sich HEGGEMANN als international anerkannter Spezialist für die Entwicklung und Fertigung komplexer metallische Leichtbaustrukturen in der Luft- und Raumfahrtindustrie sowie im Bereich der Automobilindustrie etabliert. Gemäß dem Unternehmensmotto „360° - from Engineering to Production“ realisieren dabei ca. 230 Mitarbeiter für Kunden die komplette Wertschöpfungskette von der Entwicklung über die Serienreifmachung bis zur Produktion einbaufertiger Strukturen und Systeme. Insbesondere das Manufacturing & Quality Engineering zur Auslegung der stückzahloptimierten Herstellung sowie stetige Innovationen zeichnen das inhabergeführte Unternehmen seit 60 Jahren aus.

Zum Zeitpunkt des Projektstarts Anfang 2018 beschäftigte HEGGEMANN 18 Mitarbeiter im Bereich F&E. Für die Projektbearbeitung standen neben der ausreichenden Personalkapazität im Engineering und einer ausreichend großen Fläche in der Fertigung auch die schweißtechnische Infrastruktur und das Know How zur Absicherung von Schweißprozessen gemäß gültigen Qualitätsanforderungen zur Verfügung. Für die Qualitätsabsicherung konnte über die Projektlaufzeit zudem auf eine 3D-Bauteilvermessung zum berührungslosen Scannen von Bauteilen, weitere Mess- und Prüfeinrichtungen für die Kontrolle der geforderten Toleranzen und Verarbeitungsqualitäten sowie ein eigenes Werkstofflabor mit zwei Werkstoffprüfern zurückgegriffen werden. Das Werkstofflabor ist dabei dem Engineering zugeordnet. Zum Ende des Projekts Mitte 2022 beschäftigt HEGGEMANN 23 Mitarbeiter im Engineering.

HEGGEMANN verfügt über langjährige und umfangreiche Kompetenzen im Umgang mit dem Werkstoff Titan im Bereich der zerspanenden Bearbeitung, des Schweißens, der Blechbearbeitung sowie der Montage von ganzen Baugruppen. Marktseitig und vor allem umweltpolitisch bestand und besteht weiterhin die dringliche Notwendigkeit, effizientere Fertigungsverfahren insbesondere für hochpreisige und energetisch sehr aufwendig zu verarbeitende Strukturwerkstoffe, wie die im Projekt verwendeten hochfesten Titanlegierungen, zu entwickeln und in die Industrialisierung zu überführen.

Für ein kleines Unternehmen war HEGGEMANN zu Beginn des Projekts in Teilbereichen bereits gut digital aufgestellt. Die Additive Fertigung sollte hierauf aufbauend auch den Digitalisierungsgrad auf der Fertigungsebene weiter erhöhen und insbesondere Möglichkeiten zur Digitalisierung der Prozessabsicherung unter Berücksichtigung von Luftfahrtstandards aufzeigen.

Die hohe Fertigungstiefe bei HEGGEMANN, das umfassende Know How bzgl. der Verarbeitung auch anspruchsvoller metallischer Werkstoffe, der eigene Werkzeug- und Vorrichtungsbau und insbesondere die Erfahrung in der Entwicklung und Umsetzung komplexer Fertigungsprozesse bis zur Serie wurden für die Zielerreichung in diesem Innovationsvorhaben bei der HEGGEMANN AG erfolgreich angewendet.

### 3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Übergeordnet den technischen Herausforderungen war auch in diesem Innovationsprojekt die Erreichung der formulierten Projektziele innerhalb des beantragten und bewilligten Budget- und Zeitrahmens eine zentrale Herausforderung.

Der Erfolg des Verbundvorhabens war aufgrund der hohen Komplexität und Interdisziplinarität der Entwicklungsaufgabe daher auch wesentlich von der Zusammenarbeit zwischen den Partnern und einer klaren Aufteilung der Verantwortlichkeiten abhängig. Dabei wurden bereits in der Antragsphase die Schnittstellen zwischen den Arbeitspaketen eindeutig definiert und im Laufe der Projektbearbeitung immer wieder besprochen und weiter detailliert.

Zur Zielerreichung wurden die umfangreichen Arbeiten in diesem Innovationsvorhaben in sechs Hauptarbeitspakete (HAPs) mit in Summe sechs Meilensteinen zur Evaluierung der bis dahin jeweils generierten Entwicklungsergebnisse gegliedert. Der Gesamtverbund wurde von Aircraft Philipp respektive AMAG Components im dafür vorgesehenen AP 0 "Projekt- und Anforderungsmanagement" mit Unterstützung aller Projektpartner geführt.

Die Arbeitspakete und die Zuordnung der Verantwortlichkeiten kann dem nachfolgend in Abbildung 1 dargestellten Projektstrukturplan entnommen werden.

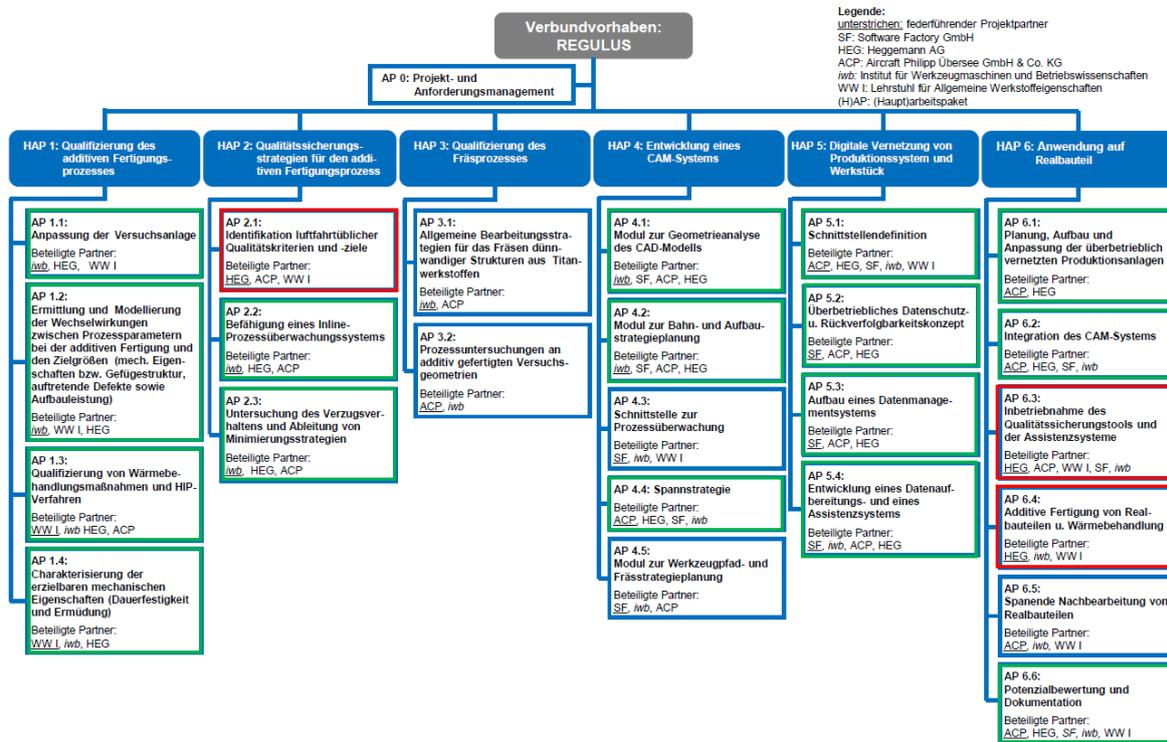


Abbildung 1: Projektstrukturplan REGULUS

HEGGEMANN war in den rot gekennzeichneten Arbeitspaketen AP 2.1, AP 6.3 sowie in AP 6.4 federführend. In den grün markierten Arbeitspaketen hat HEGGEMANN die Partner entsprechend unterstützt. Die inhaltliche Abstimmung zwischen den Partnern zu den verschiedenen Arbeitsschwerpunkten erfolgte im Rahmen von Projektmeetings, online Regelmeetings sowie durch bilaterale und bedarfsgerecht eingeplante Abstimmungen.



#### 4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Titan verfügt unter den Metallen insbesondere in Form hochfester Legierungen über das günstigste Verhältnis von Dichte zu Festigkeit (statisch und dynamisch) gepaart mit einer sehr hohen Temperatur- wie auch Korrosionsbeständigkeit. Bauteile aus Titanlegierungen kommen deshalb insbesondere in der Luftfahrt in hochbelasteten Bereichen wie Triebwerk, Struktur und Aerodynamik zum Einsatz, wo sie aufgrund dieser spezifischen metallurgischen und mechanischen Eigenschaften anderen Werkstoffen überlegen sind.

Strukturteile in Leichtbauweise sind oftmals aufgrund geringer Wandstärken vor allem durch große Oberflächen im Verhältnis zum Bauteilgewicht und höchster Sicherheitsrelevanz (Sicherheitsklasse 1 Bauteile) charakterisiert. Die sehr guten metallurgischen und mechanischen Eigenschaften bringen jedoch gleichzeitig eine relativ zeitintensive Bearbeitbarkeit mit subtraktiven Verfahren mit sich, bei zugleich vielfach höheren Kosten für Halbzeuge im Vergleich zu klassischen Aluminium- und Stahlstrukturlegierungen. Diesen Zustand mit einem additiven Verfahren hinsichtlich des Materialeinsatzes („Buy-to-Fly Ratio“) zu verbessern war die wesentliche Motivation für das REGULUS Vorhaben.

Die jahrzehntelange Erfahrung bei HEGGEMANN bei der Industrialisierung neuartiger Fertigungstechnologien und im Lichtbogenschweißen von Titanlegierungen, die recherchierten und bekannten internationalen Ergebnisse der Vorarbeiten zum WAAM-Prozess sowie die ausgewiesenen Expertisen der Verbundpartner haben HEGGEMANN im Vorfeld der Projektbeantragung in der Annahme bestärkt, dass die angestrebten und formulierten Projektziele im REGULUS Vorhaben erreichbar sind.

Bei Projektstart konnte somit an entsprechende Vorkenntnisse angeknüpft werden. Materialtechnisch war das Soll-Gefüge nach Luftfahrt-Qualitätsstandards definiert. Daher sollten über die Regulierung des Thermomanagements im Prozess die Gefügestruktur und damit die mechanischen Eigenschaften eingestellt werden können. Ziel war es, eine geometrieunabhängige reproduzierbar sichere Prozessroute zu identifizieren, welche ein luftfahrttauglich Materialqualität im geschweißten Halbzeug liefert. Die Fähigkeit des CMT-Schweißverfahrens (CMT = Cold Metal Transfer) war bereits an einfachen Probengeometrien nachgewiesen worden. Die Skalierung auf größere und komplexere Geometrien bis hin zu bauteilmusterähnlichen Strukturen war eine zentrale Aufgabe im REGULUS-Vorhaben.

Bzgl. der Qualitätsüberwachung im laufenden Prozess (Inline-Prozessüberwachung) existierten bei Projektbeginn Lösungsansätze für das Verbindungsschweißen und ansatzweise für pulverbettbasierte additiven Fertigungsverfahren. Den Übertrag auf einen lichtbogen- und drahtbasierten additiven Fertigungsverfahren nach Luftfahrtstandard musste HEGGEMANN im Projektverbund noch entwickeln und in eine industriennahe Demonstrationsanwendung übertragen.

Unter diesen Randbedingungen startet das Verbundvorhaben REGULUS offiziell am 1.1.2018.

#### 4.1 Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden

Bei Projektbeantragung wurden lediglich vereinzelte Schutzrechte hinsichtlich der additiven Fertigung von endkonturnahen Rohlingen aus Titanwerkstoffen recherchiert. Die Schutzrechtsrecherche wurde projektbegleitend fortgeführt. Während der Projektlaufzeit wurden weitere Schutzrechte zum Thema Lichtbogenbasierte Additive Fertigung offengelegt, auch in Verbindung mit hochfesten Titanlegierungen. Keines der bekannten Schutzrechte wurde jedoch im REGULUS Vorhaben direkt in Anspruch genommen oder verletzt, lediglich auf das von der Fa. Fronius patentierte CMT-Schweißverfahren zurückgegriffen. Durch die Einbindung von FRONIUS als assoziierter Projektpartner konnten dahingehend auch neueste Entwicklungsergebnisse genutzt werden, da diese dem Projektverbund von FRONIUS bereitgestellt wurden.

Der Anlagenaufbau bei HEGGEMANN besteht aus Standardkomponenten der industriell automatisierten Schweißtechnik. Das im Rahmen des Verbundvorhabens entwickelte Know How steckt in der Verkettung, Steuerung und Regelung dieser Komponenten und insbesondere in der Prozessüberwachung. Somit wurde auch diesbzgl. kein bestehendes Schutzrecht in Anspruch genommen oder verletzt.

Aus qualitätstechnischen Gesichtspunkten hat sich während der REGULUS Projektlaufzeit gezeigt, dass die additive Fertigung mittels Lichtbogen, den sogenannten DED (Direct Energy Deposition) Prozesse, zunehmend Anwendung finden. Quasi parallel zum REGULUS-Projekt sind seit Anfang 2019 international mit der AMS 7005 und 2020 mit der AMS 7010 zwei Normen entstanden, die den drahtbasierten Plasma- und Laserprozess beschreiben und für die Luftfahrt zugänglich gemacht haben. Auch in Deutschland sind in dieser Zeit einige Normen auf den Weg gebracht worden, wie die DIN SPEC 17071 und die DIN 17024-Reihe, wobei die DIN 17024-2 auf WAAM mittels CMT-Lichtbogen angewendet werden kann. Im Wesentlichen sind diese aus Normen für das Verbindungsschweißen abgeleitet worden und zeigen auf die elementarsten Einflussfaktoren, den sog. Key Values aus den AMS-Normen.

HEGGEMANN war es durch die parallel zur Projektlaufzeit erfolgten Veröffentlichungen entsprechender Normen und Regelwerke möglich, die eigenen Entwicklungsarbeiten kontinuierlich mit dem sich weiter entwickelnden Stand der Technik bzgl. der Qualitätsanforderungen abzugleichen und entsprechende Informationen in die Entwicklungsarbeiten einfließen zu lassen.

#### 4.2 Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste

Sowohl für die Projektbeantragung als auch parallel zur Projektlaufzeit wurde insbesondere zu den Meilensteinen des Innovationsvorhabens der Stand der Technik hinsichtlich neuer Veröffentlichungen zu lichtbogenbasierten Additiven Fertigungsverfahren für Titanlegierungen recherchiert. Hierzu wurden neben den Suchprogrammen im Internet entspr. Förderdatenbanken und die Technische Informationsbibliothek Hannover verwendet. Über den Projektverlauf konnte ein zunehmendes Interesse am Markt und damit einhergehend eine zunehmende Zahl an Veröffentlichungen beobachtet werden.

Wie die nachfolgende Liste an Veröffentlichungen zeigt, wurde und wird nach wie vor intensiv an innovativen Verfahren geforscht und gearbeitet, um die Herstellung von Titanbauteilen und insbesondere hochfester Titan-Strukturteile zu optimieren. Folgende relevanten Literaturquellen wurden während der Projektlaufzeit recherchiert:

Nr.	Titel
[1]	Additive Manufacturing of Liquid Rocket Engine Combustion Devices: A Summary of Process Developments and Hot-Fire Testing Results, 54th AIAA/SAE/ASME Joint Propulsion Conference 2018, NASA Marshall Space Flight Center, Huntsville, Alabama
[2]	Energetische Bilanzierung von Fügeverfahren, Mayr, P. und Hälsig, A., 2. Methodensworkshop der Querschnittsarbeitsgruppe „Energetisch-wirtschaftliche Bilanzierung“ des Spitzentechnologieclusters eniPROD, 14. November 2012, Chemnitz
[3]	Webseite, Zugriff: 21.06.2021: 09.00Uhr, <a href="https://www.bundesregierung.de/bregde/themen/digitalisierung">https://www.bundesregierung.de/bregde/themen/digitalisierung</a>
[4]	Webseite, Zugriff: 21.06.2021: 09.26Uhr, <a href="https://www.beuth.de/de/regelwerke/vdi/richtlinienreihe-vdi-3405">https://www.beuth.de/de/regelwerke/vdi/richtlinienreihe-vdi-3405</a>
[5]	DIN EN ISO/ASTM 52900:2017-06 - Additive Fertigung - Grundlagen - Terminologie (ISO/ASTM 52900:2015), Deutsche Fassung EN ISO/ASTM 52900:2017
[6]	SAE AMS 7005:2019-01-31 - Wire Fed Plasma Arc Directed Energy Deposition Additive Manufacturing Process
[7]	SAE AMS 7010:2020-01-14 - Wire Fed Laser Directed Energy Deposition Additive Manufacturing Process (L-DED-wire)
[8]	AC7110/14 REV. B, Revision Date 16-NOV-2020, AUDIT CRITERIA FOR WELDING For LASER AND ELECTRON BEAM METALLIC POWDER BED ADDITIVE MANUFACTURING
[9]	DIN EN ISO 3834 Reihe - Qualitätsanforderungen für das Schmelzschweißen von metallischen Werkstoffen
[10]	AC7110/5 REV. I, Revision Date 11-Sep-2020, AUDIT CRITERIA FOR WELDING-For FUSION WELDING
[11]	DIN SPEC 17071:2019-12 - Additive Fertigung - Anforderungen an qualitätsgesicherte Prozesse für additive Fertigungszentren
[12]	DIN 17024-2:2020-10 - Additive Fertigung - Prozessanforderungen und Qualifizierung - Teil 2: Materialauftrag mit gerichteter Energieeinbringung unter Verwendung von Draht und Lichtbogen in der Luft- und Raumfahrt

[13]	DIN EN 9300 Reihe - Luft- und Raumfahrt - LOTAR - Langzeit-Archivierung und -Bereitstellung digitaler technischer Produktdokumentationen, wie zum Beispiel von 3D-, CAD- und PDM-Daten
[14]	J. Frochte, Maschinelles Lernen – Grundlagen und Algorithmen in Python, 3. Auflage, 2021, Carl Hanser Verlag, München
[15]	Zhiqiang et. al.: The color changes and tensile properties of oxidized Ti–6Al–2Mo–1.5Cr–2Zr–2Sn–2Nb alloy, Article, Journal of Alloys and Compounds 640 (2015) 488–496, Elsevier
[16]	ASM Handbook, Vol. 6: Welding, Brazing and Soldering, ASM International, 1993
[17]	BMS7-361 - TITANIUM 6AL-4V PREFORMS FROM MELT POOL ADDITIVE MANUFACTURING ON A SUBSTRATE, Boeing Material Specification, Rev. C, 2018

Die durchgeführten Recherchen lassen jedoch keine Anhaltspunkte erkennen, wonach der innovative Kern des Vorhabens Gegenstand entsprechender Veröffentlichungen ist bzw. bestehende und während der Projektlaufzeit offengelegte Schutzrechte einer späteren Ergebnisverwertung entgegenstehen könnten.

## 5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Durch die interdisziplinäre Zusammensetzung des REGULUS-Projektkonsortiums war seitens HEGGEMANN keine darüberhinausgehende Zusammenarbeit mit weiteren Stellen erforderlich. Insbesondere auch die assoziierten Partner haben über den gesamten Projektverlauf die Entwicklungsarbeiten sehr konstruktiv und tatkräftig unterstützt und somit wesentlich zum erfolgreichen Projektabschluss beigetragen. Alle wissenschaftlichen Aufgabenstellungen konnten mit den beiden Partnern der Technischen Universität München und der Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg gelöst werden.

Die folgende Abbildung zeigt die Zusammensetzung des Projektverbunds mit den geförderten und assoziierten Partnern (FRONIUS, BOEING).



Abbildung 3: Projektconsortium REGULUS mit geförderten und assoziierten Partnern

Bei der Auslegung der Anlagen-, Steuer- und Regelungstechnik sowie der Implementierung der Prozessüberwachung wurden potenzielle Lieferanten im Rahmen eines Standard Anfrageprozesses inkl. einer vorab geschlossenen Geheimhaltungsvereinbarung eingebunden.

## Eingehende Darstellung der Projektergebnisse

### 6. Verwendung der Zuwendung und Darstellung der erzielten Ergebnisse im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Die inhaltliche Projektarbeit konnte mit dem Zuwendungsbescheid vom 29.11.2017 zum 01.01.2018 begonnen werden.

Die luftfahrtspezifische Prozessabsicherung inkl. der Datenerfassung in dem hoch dynamischen WAAM-Prozess stellte sich als die größte Herausforderung im Projekt heraus und hat in Kombination mit der Coronapandemie in der zweiten Hälfte der Projektlaufzeit zu einem Verzug entgegen dem ursprünglichen Projektplan geführt. Daher beantragte HEGGEMANN nach erfolgter Abstimmung mit allen Partnern am 29.09.2021 eine kostenneutrale Laufzeitverlängerung des Vorhabens um sechs Monate sowie eine Umwidmung einzelner Kostenarten zugunsten weiterer Personal- und Materialmittel. Mit der Bewilligung dieser Laufzeitverlängerung und Mittelumwidmung vom 23.11.2021 konnte das REGULUS Vorhaben weitergeführt und dann zum 30.06.2022 erfolgreich abgeschlossen werden. Die für das Projekt vom BMWK gewährten Zuschüsse und die von HEGGEMANN bereitgestellten Eigenmittel wurden zum überwiegenden Teil für Personalkosten aufgewendet. Eine Übersicht zur Verwendung der Mittel ist in Kapitel 8 „Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises“ dargestellt.

Zielstellung des Projekts war die Entwicklung einer nach luftfahrttechnischen Qualitätsstandards qualifizierbaren und überbetrieblich vernetzten Fertigungsprozesskette von additiver und spanender Bearbeitung zur ressourceneffizienten Herstellung von Titan-Großstrukturen. Es sollte dabei der Nachweis erbracht werden, dass die Herstellung dieser Titan-Strukturteile materialeffizient und prozesssicher sowie wirtschaftlich und unter Berücksichtigung der schweißtechnischen Qualitätsstandards der Luftfahrt in einem teilautomatisierten vernetzten Herstellprozess im industriellen Umfeld möglich ist.

Die quantitative Bewertung der Zielerreichung wurde anhand eines skalierten Referenzbauteils zum Ende des Projekts in Abstimmung mit dem Projektpartner AMAG Components durchgeführt. Nachfolgend sind die im Verlauf des Vorhabens von HEGGEMANN erarbeiteten Ergebnisse, nach Arbeitspaketen strukturiert, eingehend beschrieben und dargestellt.

## HAP 0 – Projekt- und Anforderungsmanagement

In diesem Arbeitspaket erfolgte bei HEGGEMANN die Teilprojektkoordination sowie die Kommunikation mit den Verbundpartnern, um die Projektziele durch den abgestimmten Arbeitsplan innerhalb des bewilligten Zeit- und Kostenrahmens zu erreichen. Ebenso fällt die Dokumentation der Arbeitsergebnisse und die Nachweisführung für den Projektträger in dieses Arbeitspaket.

Entsprechend der Arbeitspakete fanden über den gesamten Projektzeitraum Absprachen mit einzelnen oder mehreren Projektpartnern statt, die durch mehrere Besuche vor Ort ergänzt wurden. Zu den Meilensteinen bewertete HEGGEMANN in Abstimmung mit allen Partnern den Projektfortschritt und priorisierte die Arbeitsschritte für die jeweils nächste Projektphase.

Für HEGGEMANN als schweißtechnischer Fachbetrieb und für die Prozessqualität verantwortlicher Partner gestaltete sich eine sehr gute Zusammenarbeit insbesondere auch mit dem assoziierten Projektpartner FRONIUS. Durch die hervorragende Expertise von FRONIUS in Kombination mit der luftfahrttechnischen Erfahrung von HEGGEMANN konnten in der Projektlaufzeit sehr gute Fortschritte bzgl. der schweißtechnischen Prozessführung entwickelt und demonstriert werden.

Durch die Bereitstellung eines Share Points durch den Projektpartner Software Factory konnte HEGGEMANN dem Projektverbund alle relevanten Daten und Dokumente online bereitstellen. Übergeordnete Termine und Berichtszeiträume wurden dort ebenfalls bekanntgegeben.

Über die Projektlaufzeit von in Summe 52 Monaten erstellte HEGGEMANN fristgerecht die erforderlichen Berichte und Nachweise unter Verwendung des Portals „Easy Online“. Die Aufwände wurden mittels entsprechender Zahlungsanforderungen quartalsweise abgerechnet.

## HAP 1 – Qualifizierung des additiven Fertigungsprozesses

Zielsetzung dieses Hauptarbeitspaketes (HAP) war die Qualifizierung des eigentlichen WAAM-Prozesses für hochfeste Titanlegierungen, bevor dieser in HAP 2 mit entsprechenden Qualitätssicherungsstrategien weiterentwickelt wurde. Die Kombination von HAP 1 und HAP 2 unter Verwendung der digitalen Vernetzung führte zu der erfolgreichen Implementierung und Validierung des entwickelten Prozesses bei HEGGEMANN.

Die Arbeiten in HAP 1 waren in Arbeitspakete untergliedert, deren Ergebnisse nachfolgend zusammenfassend dargestellt werden.

### AP 1.1 – Anpassung der Versuchsanlage

Fokus des Arbeitspakets AP 1.1 lag auf dem Umbau einer Versuchsanlage für die ersten Grundlagenversuche bei dem Projektpartner TU München. HEGGEMANN unterstützte mit schweißtechnischem Know How, da die für die Versuchsanlage ausgewählte Prozessvariante CMT (Cold Metal Transfer /Fronius GmbH) bereits für automatisierte Fertigungsprozesse am Roboter bei HEGGEMANN seit einigen Jahren in der Produktion verwendet wurde. Die Schweißstromquelle war zu diesem Zeitpunkt eine CMT Advanced, so dass Erfahrungen und Vorgehensweisen bei der Qualifizierung von automatisierten Schweißprozessen von HEGGEMANN bei der TU München adaptiert werden konnten.

Ziel war es, einen Prozess zu entwickeln, welche stets die zu erreichen Werkstoffeigenschaften fokussiert. In enger Abstimmung mit dem Projektpartner WWI fanden erste Korrelationsbetrachtungen von Schweißparametern und deren thermo-dynamische Auswirkungen für Ti-6Al-4V statt, wodurch für das AP1.1 wichtige Weichen in der Ausstattung der Versuchsanlage gestellt wurden. Diese Betrachtungen beeinflussten im Wesentlichen die Positionierung und Anstellung des Brenners im Arbeitsraum, die Art der Schutzgaszuführung und einer möglichen Nutzung einer Schutzgaseinhausung des Arbeitsbereichs, erste Verfahrensparameter für die ausgewählte Lichtbogenkennlinie usw. In diesem Stadium wurden bereits erste Möglichkeiten zur Platzierung möglicher Zusatzsensoren evaluiert sowie erste Spannkonzpte für mögliche Bauteile und Probenkörper entwickelt. Eine Besonderheit ergab sich aus den teilweise gegenläufigen Anforderungen, möglichst viel über den Prozess im Betrieb zu erfassen, aber den Schutzgasstrom nicht wesentlich zu beeinflussen. HEGGEMANN nutzte das aus dem Verbindungsschweißen vorhandene Know How bzgl. laminarer Schutzgasanströmung, um turbulente Strömungsanteile und Strömungsabrisse zu vermeiden, was ansonsten zu Anlauffarben durch Oxidation führen würde. Die Ziele des AP 1.1 wurden im Rahmen des Arbeitsplans erreicht, detaillierte Darstellungen und Bilder sind im Bericht der TU München inkludiert. Das Arbeitspaket legte zudem den Grundstein für die erneute Recherche von Veröffentlichungen und Normen rund um den WAAM-Prozess.

### AP 1.2 – Ermittlung und Modellierung der Wechselwirkungen zwischen Prozessparametern und den Zielgrößen

In diesem Arbeitspaket unterstützte HEGGEMANN bei den Untersuchungen hinsichtlich der qualitativen und quantitativen Einflüsse relevanter Prozessparameter auf die Güte der Schweißnähte und damit auf die additiv zu erzeugende Titanstruktur. Aus den Korrelationsbetrachtungen von Schweißparametern und deren thermodynamische Auswirkungen für Ti-6Al-4V wurde in diesem Arbeitspaket eine Schweißstrategie entwickelt, welche die werkstofftechnischen Kriterien bestmöglich berücksichtigt.

In der Schweißtechnik ist es üblich, den Werkstoff über die Aufheiz- und Abkühlzeiten einzustellen. So werden beispielsweise bei Stahl, die sogenannten t8/5-Zeiten durch die Verfahrensparameter eingestellt. Dies bedeutet, dass während der Abkühlung von 800°C auf 500°C eine bestimmte vorgegebene Zeitspanne eingehalten wird, welche in Schweiß-Zeit-Temperatur-Umwandlungsschaubildern (S-ZTU) für das gewünschte Gefüge ausgewählt wurde. Die Ermittlung derartiger Umwandlungsschaubilder ist gerade in Bezug auf die hohe thermische Dynamik sehr aufwändig, denn die ZTU-Schaubilder entsprechen idealen Aufheiz- und Abkühlungsbedingungen und gelten daher z.B. für Wärmebehandlungen und den dort vergleichsweise langsam ablaufenden Wärmezyklen. Nach Stand der Technik gibt für die Ermittlung und Anwendung dieser Schaubilder weitere Hinweise, wie nachfolgend beispielhaft dargestellt.

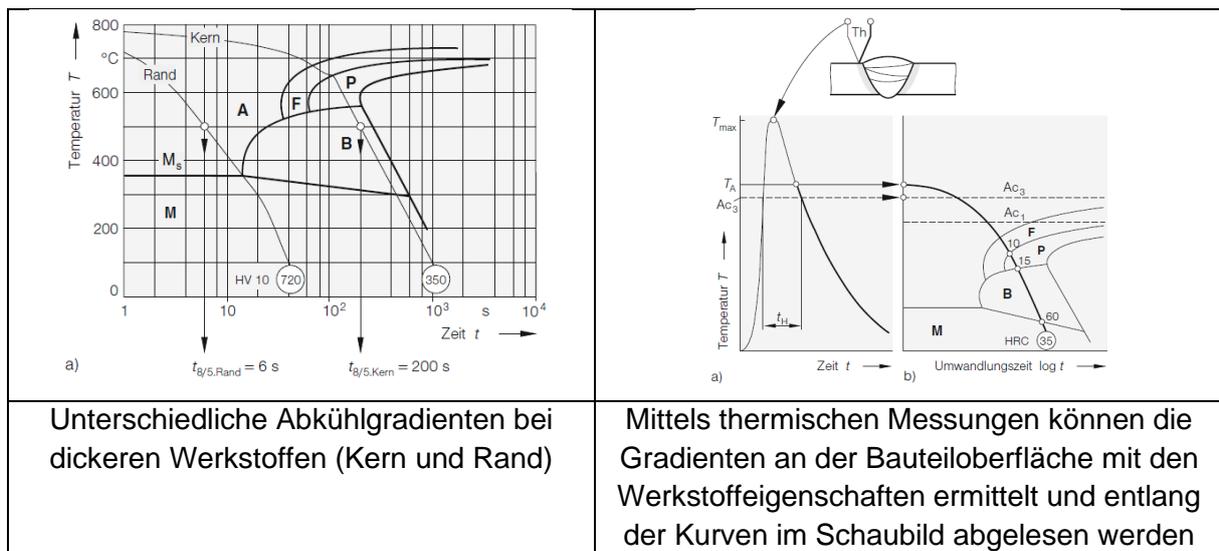


Abbildung 4: Qualitative Darstellung von Schweiß-Zeit-Temperatur-Umwandlungsschaubildern

Das Ziel im Projekt war es daher, diese metallurgischen Vorgänge bereits in der Prozessplanung für die Erstellung eines geeigneten Ablaufes zu berücksichtigen und somit beabsichtigte Werkstoffeigenschaften erreichen zu können.

Zu Beginn des Arbeitspaketes wurden erste Korrelationen anhand des ZTU-Schaubildes für Ti-6Al-4V gemäß bekannter Literaturquellen durchgeführt. Weitere Qualitätskriterien für das Gefüge wurden parallel mit luftfahrttechnischen Kunden von HEGGEMANN diskutiert und mit recherchierten Qualitätsnormen abgeglichen.

Die Prozessentwicklung wurde dadurch nicht beeinträchtigt. Einige Gefügeausprägungen, wie stark in eine Richtung konzentrierte Vorzugsrichtungen von Gefügebestandteilen ( $\alpha$ -Kolonien) sind für die Luft- und Raumfahrt nach geltenden Regelwerken ausgeschlossen. Das folgende Schaubild zeigt dazu das ZTU-Schaubild für Ti-6Al4V.

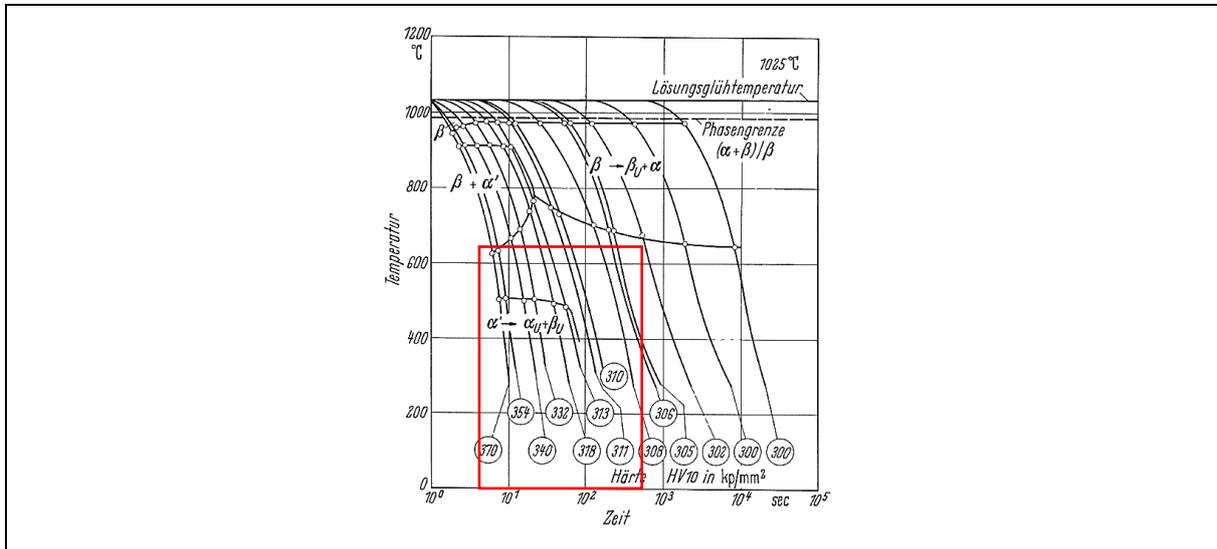


Abbildung 5: ZTU-Schaubild der Legierung Ti-6Al-4V bei kontinuierlicher Abkühlung aus dem  $\beta$ -Gebiet

HEGGEMANN hat die Möglichkeiten, Werkstoffeigenschaften wie die Härte als nachgelager-tes teilerstörendes Prüfverfahren an der Bauteilaußenseite zeitnah nach dem Schweißprozess durchzuführen und dadurch einen zeitnahen Eindruck über mögliche Eigenschaften bezüglich der Homogenität des geschweißten Gefüges zu bekommen. Es hat sich gezeigt, dass durch die summierte Energieeinbringung des mehrlagigen Schweißens weitere Kriterien für eine Vorhersage notwendig werden. Hierzu müssen aufgrund der Komplexität digitale Modelle aufgebaut und validiert werden.

Bereits in dieser Projektphase wurde durch die Ausarbeitung von verschiedenen Kundenanforderungen deutlich, dass am Ende der Prozessdurchführung viele Fragen in Bezug auf die Qualität beantwortet werden müssen und lediglich durch eine valide digitale Prozesskette die Vielzahl an Informationen ausgewertet werden können. Bereits auf Basis der Erfahrungen der pulverbasierten Druckverfahren, wie SLM (Selective Laser Melting) war bekannt, dass es deutliche Abweichungen bei gleichen Bauteilen innerhalb eines überschaubaren Bauraumes geben kann. Dies soll bei deutlich größeren WAAM-Bauteilen durch die geregelte Prozessführung ausgeschlossen werden.

Die Idee der vollständigen Prozesstransparenz wurde von HEGGEMANN in das Projekt eingebracht und von allen Partnern adaptiert und bis zum Projektende entsprechend fokussiert. Allerdings blieb die Festlegung, welche Informationen für einen Nachweis erforderlich sind, eine entsprechende Herausforderung, ebenso wie die luftfahrtkonforme Speicherung in überschaubaren Dateigrößen.

Die formulierten Ziele des AP 1.2 wurden erreicht und um weitere Herausforderungen zur Prozessabsicherung ergänzt.

### AP 1.3 – Qualifizierung der Wärmebehandlungsmaßnahmen und HIP-Verfahren

Das Ziel des Arbeitspakets AP 1.3 war die Erarbeitung von eventuell erforderlichen Nachbehandlungsstrategien zur Optimierung der mikrostrukturellen und damit auf die mechanischen Eigenschaften der mittels WAAM gefertigter Titanstrukturen.

Wie bereits im vorherigen AP dargelegt, eignen sich ZTU-Diagramme für eine Wärmebehandlungsbetrachtung. HEGGEMANN entwickelte im Rahmen von AP 1.3 einen Ansatz zur Einbindung der Schweißstrategie in den Wärmehaushalt, sodass dass idealerweise ein Spannungsarmglühen vor der zerspanenden Endbearbeitung entfallen könnte. Bei der Detaillierung dieses Ansatzes zeigte sich aber auch, dass aufgrund zu beobachtender Wechselwirkungen von Bauteilabmessungen, Schweiß- und Haltezeiten mit der Ausbildung der Mikrostruktur im Titanwerkstoff, diese Strategie eingehender betrachtet werden muss. Da das WAAM-Verfahren den Anspruch hat, auch größere Bauteile herzustellen, sind die dadurch mitunter notwendigen Haltezeiten zwischen den Lagen gegenläufig zur Verkürzung von Nebenzeiten. Dies hat somit ökonomische und ökologische Aufwände zu Folge. Die Wärmebehandlung als Nachfolgeprozess durchzuführen könnte daher Vorteile haben insofern die Bauteilabmessungen zu den üblichen Ofenabmessungen passen.

In diesem AP unterstützte HEGGEMANN die Versuche zur Homogenisierung von Gefügebestandteilen, die vor der Wärmebehandlung bereits eingestellt wurden (da ein Spannungsarmglühen keine Gefügeänderung mehr hervorruft). Dabei wurde insbesondere das werkstofftechnische Know How bzgl. Grobkornbildung in Titanschweißprozessen eingesetzt. Im Verlauf des AP 1.3 konnten somit größere Geometrien und höhere Aufbauraten erreicht werden. Werkstoffe, wie Ti-6Al-4V neigen aufgrund der Grobkornbildung und des Wärmestaus in Bauteilgrenzschichten zu Inhomogenitäten. Die Dimension des Grobkorns im Vergleich zur Rauigkeit des Prozesses durch Abscheidung übereinander angeordneter Schweißraupen führt zu einer Vergrößerung der Buy-to-Fly-Ratio, denn diese ergibt sich im Wesentlichen aus der Rauigkeit und dem Bauteilverzug sowie solcher zusätzlichen Geometrielemente zur Werkstoffhomogenität.

Einen weiteren Einflussfaktor konnte HEGGEMANN bzgl. des Lagenaufbaus bei WAAM-Halbzeugen herausarbeiten. Dieser Einfluss zeigt sich in der besseren Homogenität des Werkstoffes, wenn das Abscheiden der Schweißraupen für höhere Lagen immer in gleichen Layerhöhen stattfindet, da der sogenannte Stickout ein thermischer Haupteinflussfaktor ist (-> freie Drahtlänge am Stromkontakrohr bis zum Bauteil). Zur Einhaltung homogener Aufbauhöhen, ist eine Höhenkorrektur des Brenners durch den Roboter für die weiteren Lagen sinnvoll. Das bedeutet, dass mehr Material aufgeschweißt wird, da der Prozess so robuster ausgeführt werden kann und das Unterbrechungsrisiko sinkt. Im Vergleich zum Verlust eines großen Titanbauteils ist dieser von HEGGEMANN erarbeitete Ansatz eine sinnvollere Entscheidung. Da das Grobkorn aufgrund des geringen Umformgrades in der Rekristallisation nicht mehr rückgängig gemacht werden kann, kann als Ergebnis dieses APs festgehalten werden, dass in Abhängigkeit der Bauteilabmessung und Komplexität unterschiedliche Prozessvarianten, wie z.B. Zwischenlagenrollen, Hämmern, thermische Zwischen- oder Nachbehandlungen oder eine prozessintegrierte Wärmebehandlung erforderlich sind, um die Gefügebestandteile (thermo-) mechanisch zu verkleinern.

### AP 1.4 – Charakterisierung der erzielbaren mechanischen Eigenschaften

In enger Kooperation mit dem WWI in Erlangen sollten in diesem AP die mittels WAAM gefertigten Probenkörper hinsichtlich ihrer mechanisch technologischen Eigenschaften charakterisiert werden. Dazu wurden mit Support von HEGGEMANN Probenkörper für Mikrostrukturuntersuchungen und Proben für die Bestimmung mechanischer Eigenschaften unter Variation der Herstellparameter gefertigt. Mit dem WWI erfolgte in diesem AP die Auswahl der Normen für die Charakterisierung der Werkstoffeigenschaften sowie der Verbindung zu AP 2.1. Als Basis der Werkstoffuntersuchungen dienten dabei typische in der Luft- und Raumfahrt erforderlichen Parameter, die sich mit verfügbaren Kundenspezifikationen, Literaturangaben, Normen und Materialdatenbanken vergleichen lassen. Wichtige Kennwerte sind für typische Zielbauteile Dauer- und Zeitfestigkeit unter dynamischer Beanspruchung ermittelt worden. Prozesstechnisch wurden daher durch das iwb der TU München entsprechende Probengeometrien erzeugt, aus denen sich die gewünschte Größe und Anzahl an Proben entnehmen ließen. Das WWI hat diese anschließend untersucht und den Projektpartnern die Ergebnisse zur Verfügung gestellt. Über die Laufzeit entwickelte sich die Komplexität von einfachen zu immer anspruchsvolleren Geometrien. Mit der späteren Bereitstellung einer Zeichnung und einer Spezifikation des assoziierten Partner Boing bekam die Geometrie den Charakter eines bauteilmusterähnlichen Demonstrators (H-Probe).

Die ersten praktischen Versuche dienten der Einstellung der Restsauerstoffwerte und der Ermittlung der Wandrauigkeiten. Das linke Foto in der folgenden Abbildung zeigt auf der gefrästen Probe die primären  $\beta$ -Körner, die sich über mehrere Lagen erstrecken. Im unbefrästen Zustand sind unterschiedliche Anlauffarben zu sehen, die im weiteren Verlauf des Projektes dann nahezu vollständig vermieden werden konnten. Die Rauigkeiten lagen unterhalb von 1 mm. Zuzüglich des Verzuges der Substratplatte, konnte ein Fräsaufmaß von mindestens 3 mm für weitere Proben definiert werden. Rechts ist der Versuchsaufbau in der frühen Projektphase bei FRONIUS dargestellt. Dabei wurden über ein Auflageblech in dessen Mitte der Brenner als 0° Version durchgeführt wurde, die WAAM-Proben angefertigt. Im Zuge der Prozessoptimierungen konnten HEGGEMANN und FRONIUS den Restsauerstoffgehalt von 300 ppm auf unterhalb von 150 ppm reduzieren, wodurch keine merklichen Anlauffarben mehr erzeugt wurden.

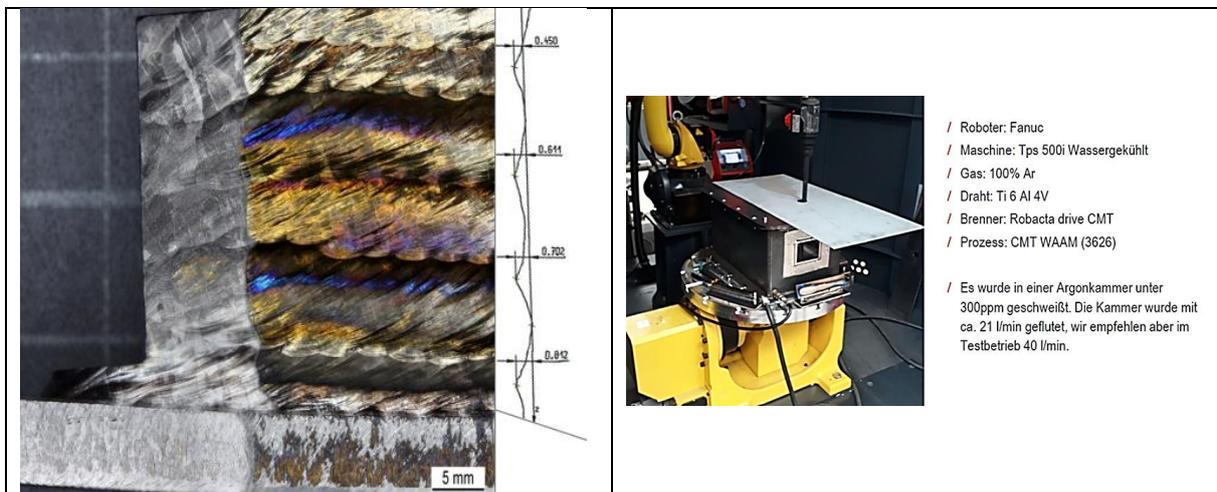


Abbildung 6: Grobkornbildung der primären die primären  $\beta$ -Pahse und erster Versuchsaufbau mit Schutzgas-einhausung des Arbeitsbereichs

## HAP 2 – Qualitätssicherungsstrategien für den additiven Fertigungsprozess

Ein Fokus der Arbeiten von HEGGEMANN für eine spätere Prozessqualifizierung nach üblichen Luftfahrtstandards lag in HAP 2 bis zum Projektabschluss auf der kontinuierlichen und projektbegleitenden Recherche und Ermittlung bestehender Nachweisunterlagen für vergleichbare lichtbogenbasierte Prozesse mit dem zu untersuchenden Werkstoff Ti-Al6-V4 und für luftfahrtzugelassene Werkstoffe im Allgemeinen.

Mit der Klassifizierung der im Additive Manufacturing angesiedelten DED (Direct Energy Deposition) Verfahren als Urformverfahren, zu denen das WAAM-Verfahren gehört, leiten sich weitere Qualitätsbetrachtungen ab. Danach wird der Bauteilhersteller zum Werkstoffhersteller und muss nachweisen, dass alle Bestandteile aus bisher verfügbaren Normen für entsprechende Halbzeuge (z.B. der AMS 4911 für Bleche aus Ti-6Al-4V) erfüllt werden. Wird z.B. der erforderliche Schweißzusatzwerkstoff als Draht eingekauft, muss für das später daraus entstehende WAAM-Bauteil der Nachweis erbracht werden können, dass die chemische Analyse der Legierungsbestandteile nach der Verarbeitung den Vorgaben entspricht.

Daraus abgeleitet ergeben sich unterschiedliche Szenarien für die Qualifizierung des WAAM-Prozesses nach Luftfahrtstandards und weitere Handlungsempfehlungen. Vor diesem Hintergrund war die Zielstellung von HAP 2 für HEGGEMANN die Erarbeitung einer Qualitätssicherungsstrategie für Titan WAAM-Bauteile gemäß bekannter Luftfahrtqualitätsanforderungen für Material- und Bauteilhersteller.

### AP 2.1 – Identifikation luftfahrtüblicher Qualitätskriterien und –ziele

Das Ziel dieses Arbeitspakets ist es, Qualitätssicherungskriterien im Bereich der luftfahrttechnischen Fertigung zu identifizieren und damit entwicklungsbegleitend den lichtbogenbasierten additiven WAAM-Prozess hinsichtlich seiner Eignung für die Herstellung von Luftfahrtstrukturen zu hinterfragen und zu bewerten. Darüber hinaus war es Aufgabe von HEGGEMANN, die an den generierten Strukturen ermittelten mechanischen Kennwerte mit Vorgaben aus Standardmaterialvorgaben für hochbelastete Luftfahrtstrukturen (Werkstoffleistungsblätter, Materialdatenbanken wie dem MMPDS etc.) zu vergleichen und zu bewerten

Die Qualität einer Produktherstellung beginnt nicht erst im Produktionsprozess, sondern beim Fertigungsunternehmen selbst. Es sind grundsätzliche Qualifizierungen für Herstellbetriebe luftfahrttechnischer Produkte erforderlich, die national und international etabliert sind. Im Rahmen dieser Harmonisierung internationaler Regelwerke hat die HEGGEMANN AG eine Zulassung als Herstellbetrieb nach EASA-Part 21G. Schweißtechnische Arbeiten dagegen werden nicht über die EN 9001 oder EN 9100 durchgeführt, da diese die prozessrelevanten Kriterien nicht regulieren. Unternehmen in Deutschland halten sich daher an die DIN EN ISO 3834 auf deren Basis weitere Geltungsbereiche durch Zertifizierungsstellen geprüft werden können.

Durch die Kunden der Luft- und Raumfahrt ergaben sich über die Jahrzehnte weitere qualitätssichernde Harmonisierungssysteme, wie NADCAP (National Aerospace and Defense

Contractors Accreditation Program), wonach HEGGEMANN für Schmelzschweißverfahren zugelassen ist. Aus NADCAP ergeben sich bereits wesentliche qualitative Vorgehensweisen, die für das Forschungsprojekt genutzt wurden.

Die NADCAP Checkliste AC7110/14 der Audit-Kriterien für die additive Fertigung mit Laser- und Elektronenstrahl-Metallpulverbett zusammen mit der Checkliste für das Verbindungsschweißen mittels Wolfram-Inert-Gasschweißen (WIG) AC7110/5 ist von Beginn an im REGULUS Projekt angewendet worden. Anschließend kamen über die über vierjährige Projektlaufzeit weiteren Normen erst hinzu.

Da HEGGEMANN ein luftfahrtzugelassenes und zertifiziertes Unternehmen auch für die schweißtechnische Herstellung fliegender Strukturen ist, konnten im AP 2.1 von Beginn an die erzielten Schweißergebnisse und die dafür angewendete Prozessführung gegen entsprechende Luftfahrtanforderungen gemessen und bewertet werden. Die folgende Abbildung zeigt die Anwendung entsprechender Normen und Regelwerke auf den WAAM-Prozess und die Einbindung in die gesamte Produktentstehungskette.

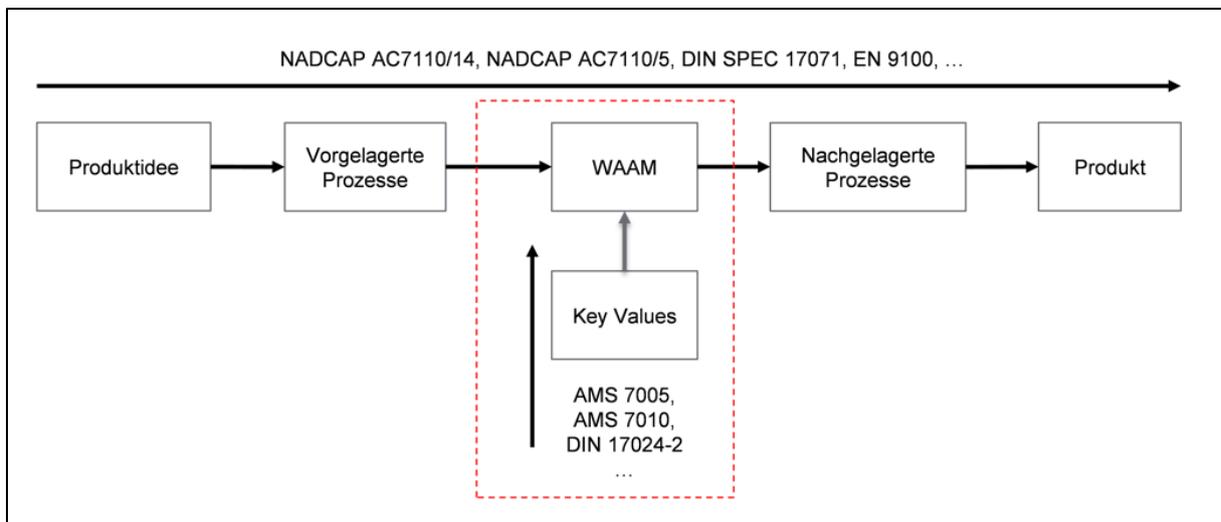


Abbildung 7: Qualitätssicherung im WAAM-Prozess durch Anwendung von Normen und Regelwerken

Bei der Recherche der bereits in der Luft- und Raumfahrt veröffentlichten Normen für andere additive DED-Prozesse konnte HEGGEMANN die AMS 7005 für Plasma-Draht-DED, die AMS 7010 für Laser-Draht-DED und die DIN 17024-2 für WAAM innerhalb der DED-Verfahren als anwendbare Richtlinien identifizieren.

Die Orientierung an den AMS-Normen für die Adaptierung auf den WAAM-Prozess erschien für HEGGEMANN am sinnvollsten. Luft- und Raumfahrtunternehmen, wie auch der der assoziierte Partner BOEING nutzen die Werkstoffkennwerte der Materialdatenbank MMPDS (Metallic Materials Properties Development and Standardization) und die in den AMS-Normen referenzierten ASTM-Normen zur Prozessqualifizierung. Eine durchgängige Qualifizierungskette nach vorhandenen Luftfahrtstandards war daher auch für den REGULUS WAAM-Prozess am sinnvollsten. Somit konnte von einer später hohen Akzeptanz im Aerospace Markt ausgegangen werden. Zur Verdeutlichung sind nachfolgend Auszüge der MMPDS-Datenbank dargestellt, worin die zur Anwendung kommenden Prüfung und die dabei einzuhaltenden Normen aufgelistet sind, um ein Material entsprechend der Luftfahrtanforderungen zu qualifizieren.

**Table 9.2.3. Summary of Required Testing Standards within MMPDS**

Property to be Determined or Procedure to be Followed	Designation	Title of Testing Standard	Relevant Section(s) within Guidelines
Bearing	ASTM E 238	Method for Pin-Type Bearing Test of Metallic Materials	9.2.3.2, 1.4.7.1.1.5.2.3
Classification of Extensometers	ASTM E 83	Method of Verification and Classification of Extensometers	9.1.3.3, 9.2.4.4.2
Coefficient of Thermal Expansion	ASTM E 831	Test Method for Linear Thermal Expansion of Solid Materials by Thermomechanical Analysis	9.2.3.4
Compression	ASTM E 9	Compression Testing of Metallic Materials	1.7.1
Creep and Rupture	ASTM E 139	Rec. Practice for Conducting Creep, Creep-Rupture, & Stress-Rupture Tests of Metallic Materials	9.2.3.9
Density	ASTM C 693	Test Method for Density of Glass by Buoyancy	9.2.3.4
Elastic Modulus – Compression	ASTM E 111	Test Method for Young's Modulus, Tangent Modulus, and Chord Modulus	9.2.3.3, 9.8.3.1
Elastic Modulus - Dynamic	ASTM E 1875  ASTM 1876	Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Sonic Resonance  ASTM test standard E 1876, "Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration.	1.4.4.8, 9.2.3.4.1, 9.2.4.4.1, 9.8.3.1, 9.8.3.2
Elastic Modulus – Shear	ASTM E 143	Test Method for Shear Modulus at Room Temperature	9.8.3.1
Elastic Modulus – Tension	ASTM E 111	Test Method for Young's Modulus, Tangent Modulus, and Chord Modulus	9.2.3.3, 9.8.3.1
Elongation	ASTM E 8	Test Method for Tension Testing of Metallic Materials	1.4.3.5
Exfoliation Corrosion	ASTM G 34	Test Method for Exfoliation Corrosion Susceptibility in 2XXX and 7XXX Series Aluminum Alloys (EXCO Test)	3.1.2.3.1
Fastener Mechanical Properties	NASM-1312	Fastener Test Methods	9.2.3.6, 9.2.4.6.3

**Table 9.2.3. Summary of Required Testing Standards within MMPDS (Continued)**

Property to be Determined or Procedure to be Followed	Designation	Title of Testing Standard	Relevant Section(s) within Guidelines
Fatigue - Load Control	ASTM E466	Recommended Practice for Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials	9.6.1
Fatigue - Strain Control	ASTM E606	Recommended Practice for Constant Amplitude Low Cycle Fatigue Testing	9.6.1
Fatigue Crack Growth	ASTM E647	Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates	9.2.3.6
Fracture Toughness - Plane Strain	ASTM E399	Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials	9.6.3
Fracture Toughness - Plane Stress	ASTM E561	Recommended Practice for R Curve Determination	9.6.3
Poisson's Ratio	ASTM E132	Test Method for Poisson's Ratio at Room Temperature	9.8.3.1
Reduction in Area	ASTM E8	Test Method for Tension Testing of Metallic Materials	1.4.3.5
Shear – Pin	ASTM B769	Test Method for Shear Testing of Aluminum Alloys	9.2.3.2, 3.1.2
Shear – Slotted	ASTM B831	Standard Test Method for Shear Testing of Thin Aluminum Alloy Products	9.2.2
Specific Heat	ASTM E1269 or ASTM E2716	Standard Test Method for Determining Specific Heat Capacity by Differential Scanning Calorimetry Standard Test Method for Determining Specific Heat Capacity by Sinusoidal Modulated Temperature Differential Scanning Calorimetry for Specific Heat of Liquids and Solids	9.2.3.4
Stress Corrosion Cracking	ASTM G47	Test Method for Determining Susceptibility to Stress-Corrosion Cracking of High Strength Aluminum Alloy Products	3.1.2.3.1
Tension	ASTM E8	Test Method for Tension Testing of Metallic Materials	1.4.4.1
	ASTM A370	Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products	1.4.4.1
	ASTM B557	Test Methods of Tension Testing Wrought and Cast Aluminum- and Magnesium-Alloy Products	1.4.4.1
Tension - Elevated Temperatures	ASTM E21	Recommended Practice for Elevated Temperature Tension Tests of Metallic Materials	1.4.4.1
Thermal Conductivity	ASTM E1225 or ASTM E2584 or ASTM E1461	Standard Test Method of Thermal Conductivity of Solids by Means of the Guarded-Comparative-Longitudinal Heat Flow Technique Standard Practice of Thermal conductivity of Materials Using a Thermal Capacitance (Slug) Calorimeter Standard Test Method for Thermal Diffusivity by the Flask Method	9.2.3.4

Abbildung 8: Auflistung erforderlicher Prüf- und Teststandards zur Werkstoffqualifizierung gemäß MMPDS

Mit Blick auf den WAAM-Prozess hat HEGGEMANN aus den genannten Normen und Regelwerken die Hauptparameterliste und die Untersuchungsumfänge der Probenkörper definiert, um die entstehenden Halbzeuge und Werkstoffe entsprechend statistisch abzusichern. Die wesentlichen und für die Materialgüte qualitätsrelevanten Prozessparameter, im Projekt als „Key Values“ bezeichnet, hat HEGGEMANN dann mit dem Projektpartner WW1 abgestimmt und priorisiert.

Die folgende Tabelle zeigt einen Auszug der sogenannten Key Values:

Lfd Nr.	Parameter	Beschreibung	Kontrolltyp	Auswirkungen	SPC
M1	Schweißstrom	Die Menge an Energie zum Aufschmelzen des Grundmaterials	Bereich (Range)	Schmelzbadeigenschaften, Aufbaueigenschaften/Mikrostruktur und Materialeigenschaften	X
M2	Schmelzbadgröße	Die Menge an aufgeschmolzenen Grundmaterials	Bereich (Range)	Verzug, Prozessstabilitätsbedingungen	
M3	Vorwärmbedingungen	Der thermische Zustand des Werkstücks vor dem Beginn der Abscheidung	Bereich (Range)	Verzug und Werkstoffveränderung	
M4	Zwischenlagentemperatur	Die thermische Bedingungen zwischen den Aufbautagen	Bereich (Range)	Schmelzbadeigenschaften, Aufbaueigenschaften/Mikrostruktur und Materialeigenschaften	
M5	Andere Prozesswärmebeeinflussung	Die Menge zu- und abgeführter thermischer Energie	Bereich (Range)	Schmelzbadeigenschaften, Aufbaueigenschaften/Mikrostruktur und Materialeigenschaften	
M6	Drahtzuführgeschwindigkeit	Der Draht wird der Schmelzzone mit einer festgelegten Geschwindigkeit zugeführt	Bereich (Range)	Schmelzbadcharakteristik, Schmelzrate und Aufbauraupenprofil	X
M7	Relative Drahtzuführrichtung zur Schweißrichtung	Je nach Drall des zugeführten Drahtes ändert sich die Position	Bereich (Range)	Positionierung der Drahtspitze während des Aufbaus	
M8	Schweißgeschwindigkeit (Roboter)	Die relative Bewegung zwischen Brenner und Werkstück	Bereich (Range)	Schmelzbadcharakteristik, Schmelzrate und Aufbauraupenprofil	
M9	Schweißdrahtdurchmesser	Der Drahtdurchmesser bestimmt den im wesentlichen die Materialauftragsrate und den möglichen Energieeintrag	Bereich (Range)	Schmelzbadcharakteristik, Schmelzrate und Aufbauraupenprofil	

HEGGEMANN hat die Key Value Liste über das ganze Projekt als Arbeitsgrundlage zur Absicherung der Material- und Prozessqualität genutzt und mit zunehmendem Kenntnisgewinn kontinuierlich erweitert und aktualisiert. Die Einhaltung und Überwachung der Key Values war zugleich das Lastenheft für die Digitalisierung des WAAM-Prozesses. Demnach gibt der Werkstoff den Prozess vor und auch die digitale Prozesskette muss alle Daten zur Absicherung der Qualität zuverlässig liefern.

Die international angewendete MMPDS-Datenbank gibt auch eindeutig vor, wie entsprechende Kennwerte mit welcher Probenanzahl zu ermitteln sind. Auch diese Vorgaben wurden auf die zu bestimmenden Material- und Gefügeeigenschaften im Projekt adaptiert.

Für die Qualifizierung eines mechanisch-technologischen Parameters, kann anhand der Tabelle die statistische Basis, die Wichtigkeit bei Qualifizierung, Probenumfang und deren Ausgangsbedingungen aufgestellt werden und es findet sich der Verweis ins Handbuch um die Versuche reproduzierbar und eindeutig durchzuführen. So erfolgte auch im Projekt eine geordnete Vorgehensweise.

Die folgende Darstellung zeigt einen kleinen Auszug aus der MMPDS zur Veranschaulichung.

**Table 9.2.4. Summary of Data Requirements within MMPDS**

Mechanical or Physical Property	Customary Statistical Basis	Relative Importance in MMPDS	Extenuating Circumstances for Special Material Usage Requirements	Minimum Data Requirements			Applicable Handbook Sections
				Sample Size	No. of Heats	No. of Lots	
Bearing Yield and Ultimate Strength <sup>a</sup> (Derived)	Same as Tensile Properties	Mandatory	Except for elevated temperature applications	20	3	10	1.4.7.1, 1.5.2.3 9.2.3.2, 9.2.3.3, 9.2.4.3
Coefficient of Thermal Expansion	Typical	Strongly recommended	Especially for anticipated range of usage	Triplicate measurements			9.2.3.4.2, 9.2.4.4, 9.8.5.4
Compression Yield Strength <sup>a</sup> (Derived)	Same as Tensile Properties	Mandatory		20	3	10	1.4.5.2, 9.2.3.2, 9.2.3.3, 9.2.4.3
Creep and Rupture	Raw Data w/ Best-Fit Curves	Recommended	Especially for elevated temperature applications	6 tests per creep strain level and temp. at least 4 temps over usage range			1.4.8.2, 9.2.3.5.4, 9.2.4.5.4, 9.2.5.2, 9.9.4
Density	Typical	Mandatory		Duplicate measurements			9.2.3.4.2, 9.2.4.4, 9.8.3.3
Effect of Temperature Curves	Same as Room Temperature Properties	Recommended	Especially for elevated temperature applications	5 <sup>b</sup>	2 <sup>c</sup>	5	9.2.3.3, 9.2.4.4.3, 9.8.5.1

Abbildung 9: Statistische Absicherung zur Werkstoffcharakterisierung durch entsprechende Tests gemäß MMPDS

Für den AP 2.1 kann zusammengefasst werden, dass HEGGEMANN entsprechende Vorgaben zur Absicherung des WAAM-Prozesses und den daraus resultierenden Titanhalbzeugen erfolgreich definieren konnte. Es wurden Key Values gemeinsam abgestimmt und als Grundlage der Prozessabsicherung verwendet. Diese Parameter wurden im Projekt bzgl. der Erfassung und Auswertung kontinuierlich getrackt und ausgewertet. Zur Dokumentation wurden die erforderlichen Informationen aus den Prozessschritten später im Projektverlauf extrahiert und für den Qualitätsbericht durch die Software Factory bearbeitet.

## AP 2.2 – Befähigung eines Inline-Prozessüberwachungssystems

Der Nachweis, dass ein Inline Prozessüberwachungssystem für die lichtbogenbasierte additive Fertigung von Titanstrukturen geeignet ist, die hohen Qualitätsanforderungen zu erfüllen, war die Zielstellung dieses Arbeitspunkts. Fokus lag auf der prozesssicheren Erreichung der gewünschten Mikrostruktur zur Einhaltung der geforderten technologisch mechanischen Werkstoffeigenschaften. Hierfür bildet das Inline-Prozessüberwachungssystem die Grundlage für eine reproduzierbar hohe Qualität. HEGGEMANN begleitete die Versuche bei dem Partner iwB an der TU München, beurteilte die Qualität der additiven Strukturen in Kooperation mit dem Partner WWI und unterstützte durch die schweißtechnische Expertise.

Durch die Vorgabe entsprechender Parameter sollte u.a. eine Homogenität im Werkstoff erreicht werden. Um dies zu realisieren wurde ein stabiler und robuster Schweißprozess angestrebt. Die Mechanismen zur Veränderung der Mikrostruktur hat HEGGEMANN kooperativ in HAP1 erarbeitet. Daraus konnten Hinweise auf die thermische Prozessführung abgeleitet werden, abhängig von den Grenzen der Anlagentechnologie (Stromquelle ≤ 500A), der Lichtbogenart und –kennlinie, den thermischen Eigenschaften des Werkstoffes, der Materialdicke, des Umgebungsgases, der Energiedichte und des Lichtbogendruckes, der Viskosität des Schmelzbades, des Umgebungsgases und deren Potential auf die Oberflächenspannung an

der freien Schmelzenoberfläche uvm. Die Komplexität zur Beherrschung dieser ganzen Parameter lässt sich bereits allein in ihrer Aufzählung erahnen und war eine der größten Herausforderungen im Verbundvorhaben.

Die Haupteinflüsse wurden daher zu Klassen zusammengefasst und der technologische Haupteinfluss auf diese Klasse hin untersucht und fixiert, so wie es in der Versuchsplanung gemacht wird. Das Maximum der gleichzeitig beherrschbaren Einflüsse ergab sich durch das Festhalten der Stickoutlänge und des Drahtvorschubes, der Festlegung des Schutzgases und Schweißposition sowie der Kontrolle über Oxidationsmöglichkeit während der reaktionsreichen Temperaturphasen.

Als zu kontrollierend Inline-Prozessparameter wurden ermittelt:

1. Aktive Stickoutkorrektur
2. Geometriehöhe der Layer (Offset wird in der nächsten Lage berücksichtigt)
3. Zwischenlagentemperatur
4. Restsauerstoffkonzentration
5. Temperatur-Zeit Verläufe

Die Korrelation von Abkühlungszeiten, also der Vergleich mit  $t_{10/6}$ -Zeiten (bei Ti-6Al-4V finden die wesentlichen Gefügeumwandlungen zwischen 1050°C und 600°C statt) aus einem Zeit-Temperatur-Umwandlungsschaubild sind qualitativ darstellbar. Allerdings sind die Wiedererwärmungszyklen und deren metallurgische Auswirkung für den WAAM-Prozess noch nicht ausreichend bekannt. Möglicherweise müssten Schweiß-Zeit-Temperatur-Umwandlungsschaubilder für den Fall der Wiedererwärmung und partielles Umschmelzen aufgestellt werden, woraus sich weiterer Forschungsbedarf ableiten lässt. Mit dem vorhandenen Werkstoff-Know How kann allerdings in diesem Projekt eine Abschätzung gegeben werden, die den Einfluss der primären  $\beta$ -Korn-Bildung über mehrere Lagen in die Druckrichtung (Höhe, Building Direction) aber auch nur teilweise berücksichtigt. Der grundlegende Mechanismus, dass längere Abkühlzeiten zu globulareren Anteilen führen ist aber dennoch gegeben

Zusammen mit der werkstofftechnischen Expertise des Projektpartners WW1 konnte HEGGEMANN somit die Ziele dieses Arbeitspakets erreichen und die Grundlagen für ein Inline-Prozessüberwachungssystem des WAAM-Prozesses erarbeiten.

### **AP 2.3 – Untersuchung des Verzugsverhaltens und Ableitung von Minimierungsstrategien**

HEGGEMANN hat in diesem AP den schweißtechnischen Background zugearbeitet und insbesondere bei der Ableitung von Minimierungsstrategien zur Zielerreichung beigetragen. ACP hat in diesem Zusammenhang primär Spanntechniken zur Vermeidung des Verzuges untersucht. Die Minimierung des Bauteilverzuges hat sowohl ökonomische Hintergründe, wie auch ökologische und ist auch ein wesentlicher Faktor zur Optimierung der Buy-to-Fly-Ratio. Schweißtechnisch bedeutet eine Behinderung oder Verhinderung von thermischen Dehnungen eine erhöhte innere Spannung, die ohne eine nachgelagerte Wärmebehandlung im Fräsprozess frei werden kann. Eine Verhinderung des Bauteilverzuges geht daher indirekt mit einer

Wärmebehandlung einher (Spannungsarmglühen). Die Möglichkeit des Spannungsarmglühens durch lange Haltezeiten bei Zwischenlagen könnte noch relevant werden, bedarf aber eigenen Versuchsreihen, die sehr umfangreich sind und nicht Teil dieses AP's und Projektes.

Für den WAAM-Prozess hat HEGGEMANN daher u.a. die Strategie abgeleitet, durch eine prozessintegrierte Wärmebehandlung neben den gewünschten Materialeigenschaften auch das Verzugsverhalten positiv zu beeinflussen. Darüber hinaus ist eine robuste Spanntechnik immer als zusätzliche Maßnahme zu betrachten, den Verzug zu minimieren. Die folgende Tabelle zeigt die sechs erarbeiteten Ansätze zur Verminderung des Bauteilverzugs.

Nr.	Maßnahmen	Auswirkung
1	Wärmeausdehnung in die Höhe zulassen – Layerhöhen nicht unterschiedlich	Verminderung Bindefehler, Anpassung der Höhe im CAD für Geometrieelemente kleinerer Unterschiede
2	Wanddicken angleichen	Thermische Einbringung und Abkühlung harmonisieren – Design ist besser abzustimmen
3	Schweißrichtung von Geometrieelementen je Layer umdrehen	gleichmäßigere Höhe durch Ausgleich von Materialanhäufungen und Geometrieabfall an Nahtanfang und -ende
4	Optimierung der Gesamttemperaturentwicklung und Planung der Zwischenlagentemperatur	Druck- und Zugspannungsanteile je Layer durch Richtungswechsel (siehe Punkt 3) ausgleichen – möglicherweise Einsparung des Spannungsarmglühens
5	Aufdickung der Substratplatte	Steifigkeitserhöhung
6	Vorwärmung und Schweißen "in einer Wärme"	Vorgewärmte Substrate benötigen weniger Energie und die Schweißparameter können geändert werden

Einige der dargestellten Maßnahmen sind z.T. gegenläufig. Z.B. ist eine konstante Wanddicke bzgl. der thermischen Randbedingungen und des Verzugsverhaltens besser vorherzusagen, gleichzeitig steigt jedoch auch das Zerspanvolumen. Einige Optimierungen lassen sich bereits in der Designphase durch eine prozessgerechte Konstruktion erreichen, wenn der Konstrukteur verfahrensspezifisch thermische Gegebenheiten berücksichtigt. Somit sollten für mittels WAAM-herzustellende Strukturen die prozess- und werkstofftechnischen Anforderungen bereits in der Designphase berücksichtigt werden.

Im Projekt konnten alle Partner ein diesbzgl. gesamtheitliches Verständnis über die Laufzeit erarbeiten, weshalb auch die Ziele dieses Arbeitspunktes vollumfänglich erreicht wurden.

## HAP 4 – Entwicklung eines CAM-Systems

In HAP4 wurden die Ergebnisse aus AP2.3 in eine Aufbaustrategie umgesetzt. Für HEGGEMANN war dies sehr interessant, da sich im späteren Verlauf des Projektes mit dem Aufbau der eigenen Versuchsanlage zeigte, dass die am Markt verfügbare Pfadplanungssoftware noch ungenügende Funktionen für den REGULUS WAAM-Prozess bietet, um die zu beherrschenden Prozessparameter in einem Bauteil realisieren zu können.

### AP 4.1 – Modul zur Geometrieanalyse des CAD-Modells

HEGGEMANN entwickelte zusammen mit den Partnern die Aufbaustrategien für unterschiedlich komplexe Geometrien unter Berücksichtigung der zu erreichbaren Werkstoffeigenschaften sowie der anlagentechnischen Randbedingungen. Für die im Projekt verwendeten Geometrien, der zunächst simplen Wandgeometrie, der definierten H-Probe und des bauteilmusterähnlichen Demonstrators wurde jeweils in mehreren Iterationsschleifen vorgegangen. Unter der Annahme gleichbleibender Wandrauhigkeiten und minimaler Bauteilverzüge wurden für die Geometrieanalysen Offsetmodelle aus dem 3-D CAD Design abgeleitet und in den Prozess gemäß Zielstellung dieses Arbeitspakets implementiert.

### AP 4.2 – Modul zur Bahn- und Aufbaustrategieplanung

Aufbauend auf AP 4.1 war es das Ziel dieses APs, ein Softwaremodul zu entwickeln bzw. so anzupassen, dass die Aufbaustrategie und die Bahnplanung berücksichtigt und als Eingangsdaten für den Schweißprozess bereitstellt. Hierzu kooperierte HEGGEMANN insbesondere mit dem assoziierten Partner FRONIUS.

Die bereits in HAP1 grundlegend definierten Aufbaustrategien für den Lichtbogenprozess wurden mit den technischen Möglichkeiten der Softwaretools sowie dem Support von FRONIUS realisiert und erprobt. Unter Variation der unterschiedlichen Parameter und Aufbaustrategien wurden zahlreiche Schweißversuche durchgeführt und ausgewertet. Die nachfolgende Abbildung gibt auszugsweise einen Überblick zu verschiedenen Aufbaustrategien und zeigt auch einige der im Rahmen der Schweißversuche entstandenen WAAM-Geometrien in Hardware.

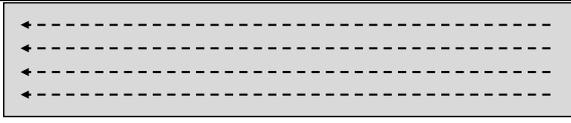
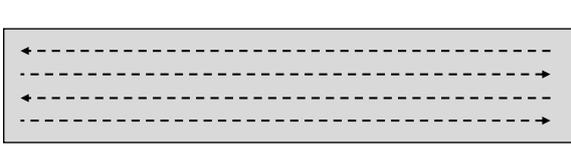
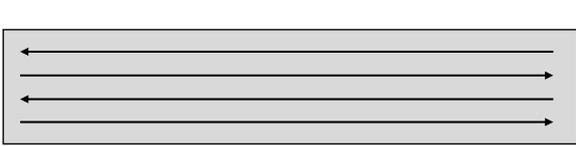
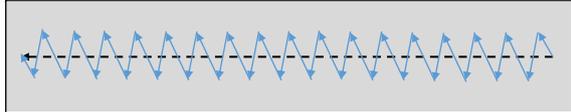
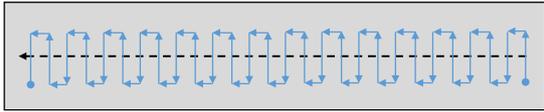
<p>Punktuelle Aufbau: Cycle Step</p>	<p>Linienaufbau</p>
	
	
	
<p>Geometrisches Pendeln</p>	<p>Mäanderförmiger Aufbau</p>
	
	

Abbildung 10: Aufbaustrategien und daraus entstandene WAAM-Probenkörper

Die punktuelle „Cycle Step Aufbaustrategie“ hat im Rahmen von REGULUS aufgrund der geringen Effizienz und Aufbaurrate keine Anwendung gefunden, soll hier aber als grundsätzliche Möglichkeit mit genannt werden. Der linienförmige Aufbau zeichnet sich durch eine hohe Schweißgeschwindigkeit aus und wird für Kreise, Bögen, dünne Wände sowie Ein- und Ausläufe angewendet.

Das geometrische Pendeln eignet sich dagegen bei etwas größeren Wand- bzw. Stegbreiten, da das Schmelzbad durch die relative Bewegung des Brenners Zwangskräfte aufbringt. Das bringt Vorteile bei Schweißpositionen die nicht in Wannennlage sind, da sich auch durch Oberflächenspannungen die geometrischen Prozessgrenzen beeinflussen lassen.

Anhand der oben dargestellten Übersicht ist gut zu verdeutlichen, dass jedes additive Herstellungsverfahren seine typischen Aufbaustrategien bietet und gerade Softwarelösungen dort stärker ausgebaut wurden, wo die Anwenderzahl groß ist. Für eine Auswahl muss eine Software hier möglichst flexibel sein. Zusammenfassend wurde das AP 4.3 erfolgreich bearbeitet und die Zielsetzung erreicht.

#### AP 4.4 – Spannstrategie

In diesem AP zur Entwicklung einer entsprechenden Spannstrategie für die nachgelagerte zerspanende Bearbeitung unterstützte HEGGEMANN die Entwicklungsarbeiten im Projektkonsortium insbesondere durch qualitätstechnischen Input unter gleichzeitiger Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit. Demnach lag der Fokus auf der Verwendung eines Einheitsspannsystems sowie auf dem Umgang mit einem Nullpunktspannsystem, zur Gewährleistung eines durchgängigen Koordinatensystems entlang der gesamten Prozesskette vom CAD bis zum späteren Messsystem.

Die Verwendung flexibler Spannsysteme hat HEGGEMANN mit Systemen der Firma Lang realisiert. Bereits bei der Konzeptionierung der additiven Fertigungszelle wurde ein Nutentisch vorgesehen, dessen Spannweite den Spannsystemen der Fa. Lang entspricht. Dadurch war die Übertragbarkeit auf nachgelagerte Prozesse wie Fräsen und Messen gewährleistet. Sollte diese Lösung aufgrund zu hoher Kräfte mit den aus Gusseisen gefertigten Spannern nicht möglich sein, kann alternativ eine aus vergütetem Stahl hergestellte Vorrichtung verwendet werden. Dieses Konzept berücksichtigt ebenfalls die Nutzenbreite des Lang Spannsystems.

HEGGEMANN hat sich in diesem AP sehr eng mit dem Projektpartner AMAG Components abgestimmt, um eine industriell universal einsetzbare Lösung zu entwickeln. Wo immer möglich, sollte das Spannen der Substratmaterialien mit Standardklemmhaltern realisiert werden. Die durchgeführten Versuche zeigten die sehr gute Anwendbarkeit dieser Spannstrategie und Schweißverzüge konnten entsprechend der Zielstellung dieses Arbeitspakets durch die entwickelte Spannstrategie minimiert werden.

## HAP 5 – Digitale Vernetzung von Produktionssystem und Werkstück

In diesem Hauptarbeitspaket wurde die vertikale Prozesskette mit der horizontalen digital verbunden. Hierzu mussten insbesondere Herausforderungen zur Vernetzung von zeitabhängigen Prozessdaten mit nicht zeitabhängigen Daten des Bauteils oder der Produktionsmittel gelöst werden.

### AP 5.1 – Schnittstellendefinition

In diesem AP sollten Lösungen entwickelt werden, welche die prozess- und bauteilrelevanten Informationen über die Eigenschaften der mittels WAAM aufgebauten Bauteile bzw. Halbzeuge gewährleisten. Dabei lag der Fokus der Entwicklungsarbeiten von HEGGEMANN auf der Auslesbarkeit aller erforderlichen Daten – respektive Schnittstellen, dem ortübergreifenden Datenhandling und der automatisierten Erstellung archivierungspflichtiger Datenformate. Mit dem Projektpartner Software Factory wurden auf Basis des in HAP 1 und HAP 2 erstellten Qualitätskonzeptes alle relevanten und zum Zeitpunkt der Umsetzung als sinnvoll angenommenen Hauptparameter (Key Values) digital erfasst. Dazu wurden alle Sensoren und deren übergeordnete Hardware in mehrfachen Entwicklungsiterationen harmonisiert. Somit konnten dann die Datenströme erfolgreich gespeichert und für eine Auswertung und Weiterverarbeitung bereitgestellt werden.

Die nachfolgende Tabelle zeigt die wesentlichen Schnittstellen, die prozesstechnisch verfügbar sind und durch HEGGEMANN und die Software Factory zusammengeführt wurden.

Plattform	Key Value	Schnittstelle	Übertragung	Datentyp
<b>Stromquelle</b>	Drahtvorschub	OPC UA	4Hz	float
<b>Stromquelle</b>	Strom	OPC UA	4Hz	float
<b>Roboter</b>	X-Position	XML Stream	250Hz	float
<b>Roboter</b>	Y-Position	XML Stream	250Hz	float
<b>Sensoren</b>	Temperatur	ProfiNET/TCP	10Hz	float

Die Fronius TPS500i Stromquelle bietet dabei unterschiedliche Schnittstellen an, beispielsweise MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) und OPC/UA (Open Platform Communication Unified Architecture), die sich in der Art der Messdaten und der Übertragungsraten unterscheiden.

Das Hauptaugenmerk von HEGGEMANN lag darauf, die Stromquelle TPS500i, den ABB Roboter ID2600 und die dazugehörigen IRC5 Steuerung erfolgreich zu harmonisieren und die Datenerfassung erfolgreich zu automatisieren. Einige der eingesetzten Sensoren bieten nur eingeschränkte Möglichkeiten zum Datenexport. Hierfür wurden durch die Software Factory entsprechende Lösungen entwickelt und bereitgestellt, sodass bei der HEGGEMANN WAAM-Anlage alle erforderlichen Daten erfasst und ausgewertet werden können. Durch den Einsatz der neuesten Generation der Schweißstromquelle (TPS500i), können zudem weitere Daten auf Wunsch bereitgestellt werden, die evtl. für andere Werkstoffe und Aufgaben relevant sein könnten.

Das Arbeitspaket wurde somit von HEGGEMANN erfolgreich abgeschlossen.

### AP 5.2 – Überbetriebliches Datenschutzkonzept und Rückverfolgbarkeit

In diesem Arbeitspaket unterstützte HEGGEMANN den federführenden Partner Software Factory mit der Bereitstellung von Daten sowie dem Wissen um die Anforderungen in der Luftfahrt bzgl. Rückverfolgbarkeit. Somit wurden die konkreten Anforderungen von HEGGEMANN aus dem Luftfahrttechnischen Qualitätsverständnis heraus formuliert, um eine 100%-ige Rückverfolgbarkeit der Bauteile inkl. der zugeordneten Prozessparameter aus dem WAAM-Prozess zu gewährleisten. Aus den Anforderungen der DIN EN 9100 ergeben sich zusätzlich zu ISO 9000 weitere Qualitätsmerkmale für ein Luftfahrtunternehmen. Ziel des AP's war es daher auch, neben der Rückverfolgbarkeit von Daten auch ein überbetriebliches Datenschutzkonzept zu entwickeln und umzusetzen.

Für diesen Zweck hat die Software Factory bereits bei der Eruiierung aller Daten auch eine Lösung zur Datenflexibilität entwickelt. Zu Beginn wurde bei der TU München mit Unterstützung von HEGGEMANN ein Datensystem aufgebaut, welches die vorhandenen rudimentären Daten erfassen konnte und zugleich bereits einen Fremdzugriff erlaubte. Nach weiteren Iterationsschritten und Entwicklungsschleifen zusammen mit HEGGEMANN wurde das System bei HEGGEMANN für deutlich mehr Schnittstellen und Sensoren implementiert und erprobt.

Zur Festlegung der prozessrelevanten Daten hat HEGGEMANN im Verlauf des Hauptarbeitspakets 5 die Key Value Liste weiter detailliert. Zudem wurden Schnittstellendefinitionen erarbeitet und zur Übermittlung der wichtigsten Prozessparameter beschrieben. Über den Datentyp (Speicherbedarf für das kleinste Einzelement) und die Abtastfrequenz in Hz (Speicherungen pro Sekunde) in Abhängigkeit der Prozessdynamik konnte vorab die Bandbreite für diese Datenübertragung berechnet werden. Die Bandbreite der zeitbasierten Daten ist nachfolgend schematisch dargestellt.

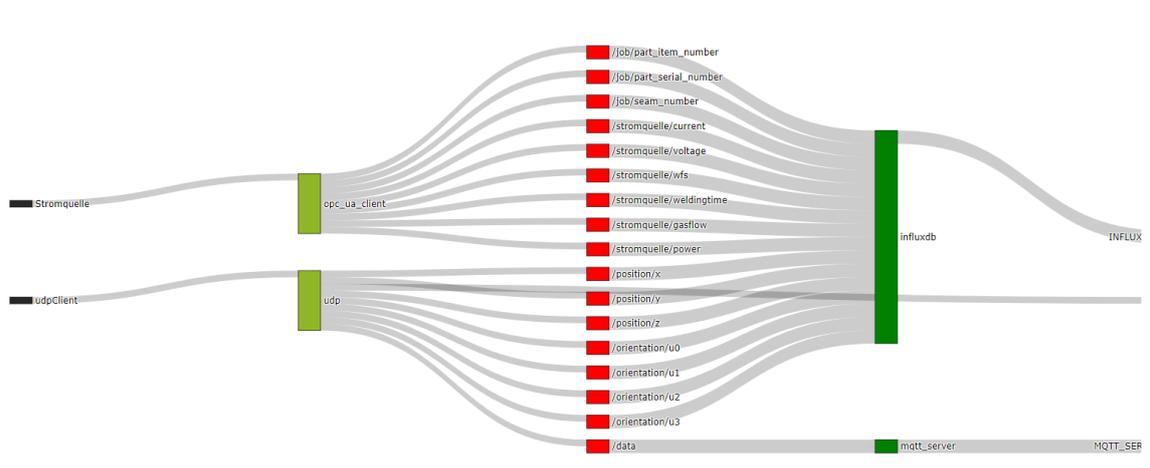


Abbildung 11: Bandbreite zeitabhängiger WAAM-Prozessdaten

Die zeitbasierten Daten der IRC5 Steuerung sind dabei über die in Abbildung 11 unterhalb dargestellte UDP Schnittstelle als XML-Stream realisiert worden. Dafür bietet die IRC5 Steuerung über die External Guided Motion (EGM) Funktion eine Lizenzmöglichkeit. Die Umsetzung erfolgt dann über MQTT oder OPC/UA, wobei die OPC/UA Schnittstelle den TCP (Tool Center Point) der Brennerspitze in Echtzeit (max. 250Hz) ausgeben kann.

Die nachfolgende Übersicht von ABB zeigt auch die Flexibilität der Schnittstellen für alle Steuerungslevel des Unternehmens. Ein Gesamtziel der Digitalisierung ist die einfache Handhabung aller Hardware und Sensoren über Standard IoT (Internet of Things) oder IIoT (Industrial IoT) mit mehr Sicherheitsfeatures, was in diesem Innovationsvorhaben auch entsprechend von der Software Factory und HEGGEMANN berücksichtigt wurde. Die Stromquellenanbindung wurde über OPC-UA realisiert, die Software Factory konnte daher mit einem KepServer, welcher auf der hausinternen Thing Worx Plattform standardmäßig vorhanden ist und als Schnittstellen-Handler funktioniert, die Daten erst im Kepserver (Gateway) bündeln und an die von HEGGEMANN definierten Zielorte weitergeben. Nicht zeitbasierte Daten werde dabei ähnlich behandelt.

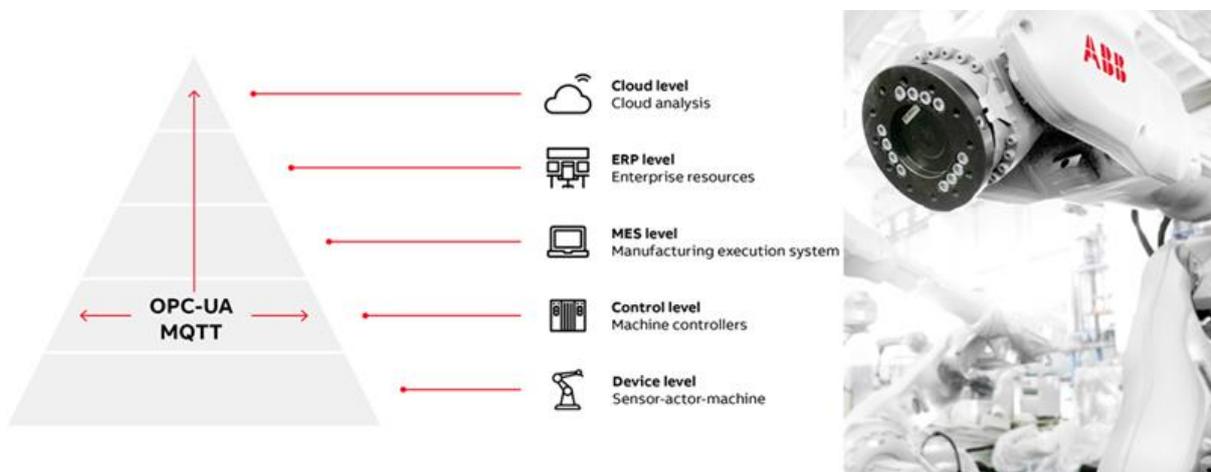


Abbildung 12: Flexibilitätsanforderungen an die industriellen Schnittstellen

Für eine hohe Echtzeitfähigkeit es Systems mit möglichst geringer Latenz hat HEGGEMANN das Netzwerk über Kabel realisiert und als kleines Subnetz erstellt, damit der Zeitstempel der zeitbasierten Datenbank (hier: InfluxDB) keine Zeitverzögerung innerhalb der Speicherungen enthält. Ansonsten würden Prozesszusammenhänge möglicherweise verzerrt abgespeichert werden.

Diese Echtzeitfähigkeit ist relevant, sobald Prozesswerte als Regelgrößen weiterverwendet werden sollen. Diese Möglichkeit der Echtzeit Regelung wurde im REGULUS-Vorhaben jedoch nicht weiter betrachtet, ist aber später als Ausbaustufe relevant, vor allem wenn mit Hilfe von Maschinellern Lernen (ML) aus den Daten z.B. eine Vorhersage im Prozess erfolgen soll (Predictive Maintenance). Somit besteht auch hier eine wissenschaftlich-technische Anschlussfähigkeit.

Für den REGULUS WAAM-Prozess wurden die Herausforderungen zur Datensicherheit und Rückverfolgbarkeit im AP 5.2 gelöst und die Anwendung der Technologie in der HEGGEMANN Anlage erfolgreich demonstriert.

### AP 5.3 – Aufbau eines Datenmanagementsystems

In diesem Arbeitspaket wurden die Ergebnisse von AP 5.1 und 5.2 mit den Erfahrungen von AMAG Components, Software Factory und HEGGEMANN kombiniert und weiterentwickelt, um ein entsprechendes Datenmanagementsystem für den REGULUS WAAM-Prozess aufzubauen. Hierzu fand zunächst die Zusammenführung aller auslesbaren Daten durch die Software Factory in der ThingWorx Plattform statt. Zur Kommunikation mit den anderen Partnern wurde eine entsprechende Server- und Cloudlösung realisiert.

HEGGEMANN hat in diesem AP die Vergleichsparameter einer anonymisierten Kundenspezifikation bereitgestellt, ebenso sowie die Luftfahrtkriterien in Form eines Arbeitsplans zur Strukturierung des Ablaufes entlang einer Bauteilherstellung. Ebenso hat HEGGEMANN die Aufbewahrungsdatenformate und die Dauer solcher Aufzeichnungen vorgegeben. Ein sehr wichtiges Thema ist die Sicherstellung der Langzeitleisbarkeit entsprechender Datenformate, so dass diese auch in 20 Jahren noch sicher gelesen und ausgewertet werden können. Es wurden von HEGGEMANN Lösungen recherchiert, die im Projektverlauf veröffentlicht worden sind, wie die LOTAR Normenreihe (prEN/NAS 9300-ff., <https://lotar-international.org/lotar-standard/>). Dieser Ansatz ist in der folgenden Abbildung dargestellt und wurde im Projekt entsprechend weiterfolgt und umgesetzt worden. Somit wurden die Ziele des Arbeitspunkts erreicht.

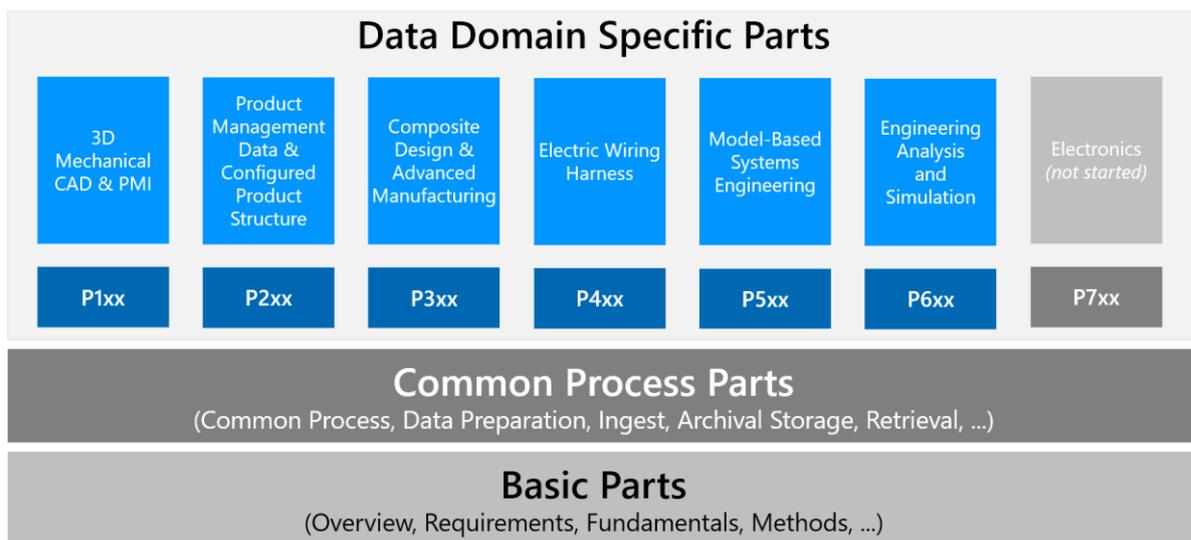


Abbildung 13: Data Domain Specific Parts gemäß LOTAR Normenreihe

### AP 5.4 – Entwicklung eines Datenaufbereitungs- und eines Assistenzsystems

Das Ziel des Arbeitspakets war die anwendergerechte Aufbereitung und Visualisierung der Daten sowie die Regelung von Zugriffsberechtigungen. Durch die entwickelten Auswertungslogiken in Form von Statistiken zum Fertigungsprozess sollten die Daten so zu nutzen sein, dass die Prozessfähigkeit und die Reproduzierbarkeit der Fertigungskette für jedes Bauteil nachgewiesen werden können.

Hierfür hat der Projektpartner Software Factory für HEGGEMANN neben der ThingWorx Plattform auch den Direktzugriff auf die InfluxDB zugelassen. Dadurch konnte HEGGEMANN weiterführende Untersuchungen und Auswertungen mit den gespeicherten Daten vornehmen und die Einhaltung der Key Values prüfen. Mit dem vorhandenen schweißtechnischen Prozesswissen hat HEGGEMANN die Daten der umfassenden Versuchsreihen ausgewertet und die Erfahrungen in die Softwareentwicklung bei der Software Factory zurückgeführt. Der Direktzugriff von HEGGEMANN wurde als Open Source Variante mittels einer Python Programmierumgebung (hier: Anaconda) realisiert.

Im nachfolgenden Screenshot ist zu erkennen, dass verschiedene Parameter wie current (Strom), gasflow (Gasfluss), part\_item\_number (Teilenummer), part\_serial\_number (Seriennummer), power (Leistung) usw. aus der Influxdb extrahiert werden konnten und durch Selektion näher untersucht und ausgewertet werden konnten.

```

Selektion unter Auswahl
...
[7]: result = client.query(string)
type(result)
[7]: collections.defaultdict

Ausgabe der Daten im Pandas DataFrame
[8]: result['egm_position_values'].head(-5) #in Klammern welche Werte angezeigt werden sollen -5, die Letzten 5
[8]:
      current  gasflow  part_item_number  part_serial_number  power  seam_number  u0  u1  u2  u3  voltage  weldingtime  i
2022-02-02 13:03:15.454000+00:00  0.000000  0.000000  122197_REGULUS  281479_2  0.000000  6.0  0.000059  0.707097  0.707116  -0.000017  0.000000  0.000000  0.0000
2022-02-02 13:03:15.903000+00:00  0.000000  0.000000  122197_REGULUS  281479_2  0.000000  6.0  0.000059  0.707097  0.707116  -0.000017  0.000000  0.000000  0.0000
2022-02-02 13:03:16.362000+00:00  0.000000  0.000000  122197_REGULUS  281479_2  0.000000  6.0  0.000059  0.707097  0.707116  -0.000017  0.000000  0.000000  0.0000
2022-02-02 13:03:16.835000+00:00  0.000000  0.000000  122197_REGULUS  281479_2  0.000000  6.0  0.000059  0.707097  0.707116  -0.000017  0.000000  0.000000  0.0000
2022-02-02 13:03:17.567000+00:00  0.000000  0.000000  122197_REGULUS  281479_2  0.000000  6.0  0.000059  0.707097  0.707116  -0.000017  0.000000  0.000000  0.0000
...
...
...
2022-02-02 13:06:44.103000+00:00  243.693069  15.007154  122197_REGULUS  281479_2  3849.732666  10.0  0.000095  0.707114  0.707099  0.000003  14.525681  22.200001  7.7271
2022-02-02 13:06:44.209000+00:00  212.757431  15.127040  122197_REGULUS  281479_2  2504.014893  10.0  0.000090  0.707112  0.707101  0.000006  13.632578  22.600000  6.1421
2022-02-02 13:06:44.301000+00:00  212.757431  15.127040  122197_REGULUS  281479_2  2504.014893  10.0  0.000088  0.707110  0.707104  0.000005  13.632578  22.600000  6.1421
2022-02-02 13:06:44.410000+00:00  212.757431  15.127040  122197_REGULUS  281479_2  2504.014893  10.0  0.000086  0.707110  0.707103  0.000007  13.632578  22.600000  6.1421
2022-02-02 13:06:44.499000+00:00  212.757431  15.127040  122197_REGULUS  281479_2  2504.014893  10.0  0.000090  0.707110  0.707104  0.000007  13.632578  22.600000  6.1421
2063 rows x 16 columns

```

Abbildung 14: Screenshot auswertbarer Prozessparameter über InfluxDB Datenbank

Dadurch konnte HEGGEMANN entsprechende Statistiken erstellen und verwenden und Prozesszusammenhänge visualisieren. Diese Visualisierung wurde verwendet, um statistische und komplexe Wirkzusammenhänge in großen Datenmengen aufzudecken. Die folgende Abbildung zeigt eine von HEGGEMANN transformierte und selektierte Auswertung der Key Values.

	Layernummer	Schweisdauer [s]	Strom I [A]	Spannung U [V]	Drahtvorschub [m/min]	Schweizgeschwindigkeit [cm/min]	Leistung [W]	Energie [kJ]	Gasverbrauch [l]
count	40.000000	40.000000	40.000000	40.000000	40.000000	40.000000	40.000000	40.000000	4.000000e+01
mean	21.500000	41.397500	183.450000	16.232500	5.622500	86.570000	3779.9925	156.495000	1.030000e+01
std	11.690452	0.015811	1.960508	0.076418	0.065974	0.04641	26.6057	1.105916	7.195946e-15
min	2.000000	41.300000	182.000000	15.900000	5.500000	86.500000	3747.6000	155.100000	1.030000e+01
25%	11.750000	41.400000	182.750000	16.200000	5.600000	86.500000	3762.0500	155.675000	1.030000e+01
50%	21.500000	41.400000	183.000000	16.200000	5.600000	86.600000	3775.3500	156.250000	1.030000e+01
75%	31.250000	41.400000	184.000000	16.300000	5.600000	86.600000	3788.9000	156.875000	1.030000e+01
max	41.000000	41.400000	192.000000	16.300000	5.900000	86.600000	3864.5000	160.100000	1.030000e+01

Abbildung 15: Aufbereitete und selektierte Parameterauswertung der WAAM Key Values

Bzgl. der Speicherformate der Daten konnte HEGGEMANN zusammen mit der Software Factory Speichermöglichkeiten evaluieren. So wurden anhand von vorhandenen Daten eine Speichertransformation in textbasierte Formate für den Austausch strukturierter Informationen, wie XML (Extensible Markup Language) oder das JSON (JavaScript Object Notation) realisiert und mit dem CSV Format (Comma Separated Values) gegenübergestellt. Das CSV Dateiformat weist dabei die geringste Lesefreundlichkeit auf bei zugleich aber geringster Speichergröße. Es ist für eine Zeilenanzahl kleiner 1 Mio. noch in Microsoft Excel zu verarbeiten und die Daten daher auch dort mit Power BI, Query oder Pivot in Dashboards darstellbar. Für lange Prozesse mit großen Datenmengen (>>1 Mio Zeilen) ist Excel dann jedoch nicht mehr verwendbar.

Ein Vorteil der strukturierten Darstellung ist die Lesbarkeit bereits in einem gewöhnlichen Editor, wie in der nächsten Abbildung dargestellt. Gemäß den aktuellen Marktbeobachtungen von HEGGEMANN werden demnach zukünftige digitale Materialzeugnisse oder Qualitätsnachweise wahrscheinlich in JSON oder XML abgebildet. XML und JSON Formate sind auch dahingehend vorteilhaft, da API (Application Programming Interface) Zugriffe größtenteils auch in den beiden Formaten stattfindet. So kann z.B. eine Cloud-Kommunikation oder das externe Einbinden von Webinformationen oder das Hochladen in eine Webapplikation realisiert werden.

Auf Basis der hier dargestellten umfassenden Entwicklungsergebnisse zur Datenaufbereitung der REGULUS Prozessdaten und der erfolgreichen Implementierung dieser Schnittstellen und Systeme bei HEGGEMANN wurden die Ziele dieses Arbeitspakets vollumfänglich erreicht.

JSON	XML
<pre>{   "record": {     "2022-02-02 13:03:15.454000+00:00": {       "time": "2022-02-02 13:03:15.454000+00:00",       "current": "0",       "gasflow": "0",       "part_item_number": "122197_REGULUS",       "part_serial_number": "281479_2",       "power": "0",       "seam_number": "6",       "u0": "5.87E-05",       "u1": "0.707097411",       "u2": "0.707116127",       "u3": "-1.68E-05",       "voltage": "0",       "weldingtime": "0",       "wfs": "0",       "x": "139.1426239",       "y": "93.25086212",       "z": "28.12918663"     }   } },</pre>	<pre>&lt;?xml version="1.0" encoding="UTF-8" standalone="yes"?&gt; &lt;welding-data xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance"&gt;   &lt;record&gt;     &lt;time&gt;2022-02-02 13:03:15.454000+00:00&lt;/time&gt;     &lt;current&gt;0&lt;/current&gt;     &lt;gasflow&gt;0&lt;/gasflow&gt;     &lt;part_item_number&gt;122197_REGULUS&lt;/part_item_number&gt;     &lt;part_serial_number&gt;281479_2&lt;/part_serial_number&gt;     &lt;power&gt;0&lt;/power&gt;     &lt;seam_number&gt;6&lt;/seam_number&gt;     &lt;u0&gt;0.0000587&lt;/u0&gt;     &lt;u1&gt;0.707097411&lt;/u1&gt;     &lt;u2&gt;0.707116127&lt;/u2&gt;     &lt;u3&gt;-0.0000168&lt;/u3&gt;     &lt;voltage&gt;0&lt;/voltage&gt;     &lt;weldingtime&gt;0&lt;/weldingtime&gt;     &lt;wfs&gt;0&lt;/wfs&gt;     &lt;x&gt;139.1426239&lt;/x&gt;     &lt;y&gt;93.25086212&lt;/y&gt;     &lt;z&gt;28.12918663&lt;/z&gt;   &lt;/record&gt;</pre>
<p>CSV</p>	
<pre>1 time;current;gasflow;part_item_number;part_serial_number 2 2022-02-02 13:03:15.454000+00:00;0;0;122197_REGULUS;2814 3 2022-02-02 13:03:15.903000+00:00;0;0;122197_REGULUS;2814 4 2022-02-02 13:03:16.362000+00:00;0;0;122197_REGULUS;2814 5 2022-02-02 13:03:16.835000+00:00;0;0;122197_REGULUS;2814 6 2022-02-02 13:03:17.567000+00:00;0;0;122197_REGULUS;2814 7 2022-02-02 13:03:18.017000+00:00;0;0;122197_REGULUS;2814 8 2022-02-02 13:03:18.468000+00:00;0;0;122197_REGULUS;2814 9 2022-02-02 13:03:18.914000+00:00;0;0;122197_REGULUS;2814 10 2022-02-02 13:03:19.494000+00:00;0;0;122197_REGULUS;2814 11 2022-02-02 13:03:19.711000+00:00;0;0;122197_REGULUS;2814 12 2022-02-02 13:03:19.804000+00:00;0;0;122197_REGULUS;2814 13 2022-02-02 13:03:19.913000+00:00;0;0;122197_REGULUS;2814 14 2022-02-02 13:03:20.006000+00:00;0;0;122197_REGULUS;2814 15 2022-02-02 13:03:20.110000+00:00;0;0;122197_REGULUS;2814 16 2022-02-02 13:03:20.202000+00:00;0;0;122197_REGULUS;2814 17 2022-02-02 13:03:20.307000+00:00;0;0;122197_REGULUS;2814 18 2022-02-02 13:03:20.388000+00:00;0;0;122197_REGULUS;2814</pre>	

Abbildung 16: Beispielhafte Gegenüberstellung von Informationen in den Formaten JSON, XML und CSV

## HAP 6 – Anwendung auf Realbauteil

Die Entwicklungsarbeiten der vorherigen HAPs wurden im HAP 6 bei HEGEMANN zusammengeführt, um den Funktionalitätsnachweis im industriellen Umfeld einer WAAM-Anlage zu demonstrieren.

Gemäß der Vorhabenbeschreibung sollten in HAP 6 bei HEGEMANN Realbauteile mit dem REGULUS WAAM-Prozess hergestellt werden, so dass zum Ende des Projekts TRL 9 (erprobter Serienprozess) erreicht werden kann. Hierzu sollte mit einem OEM eine entsprechende Bauteilgeometrie inkl. der Qualitätsanforderungen definiert werden. Zudem wurde angestrebt, das Inline-Prozessüberwachungssystem der additiven Fertigung in das Datenmanagementsystem zu implementieren und zu erproben.

Durch die hohe Komplexität der Prozessabsicherung und den daraus abgeleiteten Herausforderungen für die Entwicklung einer digitalen Prozesskette mit entsprechender Datenerfassung, Datentransparenz und Datenkonsistenz wurde im Projektkonsortium einstimmig beschlossen, die Arbeitsumfänge entsprechend zu splitten. Der Projektpartner AMAG Components hat daher eine bauteilmusterähnliche Struktur in Abstimmung mit einem Luftfahrt-OEM definiert und auf der im Projektverlauf bilateral angeschafften WAAM-Anlage des Herstellers GEFERTEC gefertigt. Mit dieser Vorgehensweise war es HEGEMANN möglich, die Ressourcen in diesem Projekt zielgerichtet für die Absicherung der Prozess- und Bauteilqualität einzusetzen, um somit den hohen Qualitätsansprüchen der Luftfahrt gerecht zu werden. Daher hat HEGEMANN alle Untersuchungen zur Qualitätsabsicherung an der bauteilmusterähnlichen H-Probe durchgeführt. Mit diesen Versuchsreihen wurden in HAP 6 die Arbeitsergebnisse der vorgelagerten Arbeitspakete in einem industrienahen Umfeld validiert.

### AP 6.1 – Planung, Aufbau und Anpassung der überbetrieblich vernetzten Produktionsanlagen

Das Ziel in diesem Arbeitspunkt war die Planung, Aufbau und Anpassung der überbetrieblich vernetzten Produktionsanlage für die Herstellung von WAAM-Titanhalbzeugen.

Die Planungsgrundlagen wurden bereits in HAP1, HAP2, HAP3 und HAP5 dargestellt. Das Zusammenführen in einem Lasten- und Pflichtenheft wurde mit zunehmenden Kenntniserfolg agil gestaltet und nicht klassisch starr über das Wasserfallprinzip realisiert. So waren bis zum Projektende in Abstimmungen mit den Projektpartnern noch Änderungen und Optimierungen möglich. Insgesamt stellte sich die Eigenentwicklung über parallele Open Source Möglichkeiten als sehr vorteilhaft heraus und dieses Prinzip folgte damit dem offenen Architekturansatz der WAAM-Fertigungszelle bei HEGEMANN generell. Durch diesen Ansatz konnte das Risiko bei Nichtetablierung des Fertigungsverfahrens deutlich gesenkt werden, da die Hardwarekomponenten auch in anderen Schweißanlagen der HEGEMANN eingesetzt werden könnten.

Auch die Kosten im Vergleich zu einer kommerziellen „Plug & Play Anlage“ waren geringer und erhöhen somit die Attraktivität dieser Technologie für KMU's wie HEGEMANN. Nachfolgend ist die im Projektverlauf bei HEGEMANN entwickelte und realisierte WAAM-Fertigungszelle mit den wesentlichen Komponenten in Abbildung 17 dargestellt.

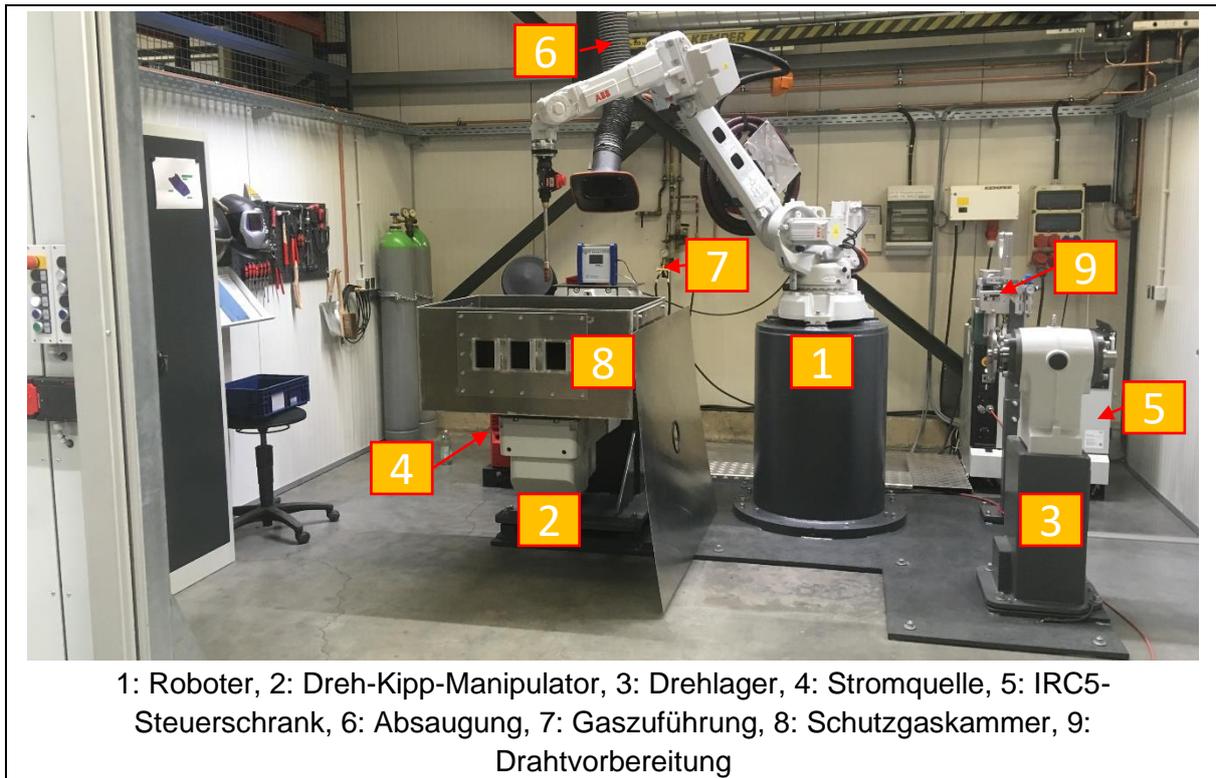


Abbildung 17: HEGEMANN WAAM-Zelle

Die Abbildung zeigt den Aufbau der Fertigungszelle bei HEGEMANN ohne geschlossene Schutzeinhausung für Ti-6Al-4V. Der Roboter (1) steht in der aktuellen Konfiguration auf einer Säule, könnte aber später auf eine Linearachse oder an ein Portal bzw. Kran montiert werden, wenn der Bearbeitungsweg für größere Bauteile angepasst werden soll. Das Dreh-Kipp-Lager (2) und das Drehlager (3) sind so positioniert, dass für größere Bauteile später eine Drehvorrichtung eingesetzt werden kann. Die Drahtvorbereitung mit Abschneiden auf Stickout und Einsprühen der Düse von Innen wird über (9) realisiert, wobei der Einsatz bei einer Schutzgaskammer ausgeklammert wird. Das senkt im ersten Anlauf den Automatisierungsgrad, was für die Erreichung der Projektziele nicht relevant ist.

Im Projekt wurde der Werkstoff Ti-6Al-4V fokussiert. Daher wurde das Schutzgaskonzept von einer starren Auflage in ein Zelt umgebaut und am Roboter mit einer eigenen Anpassungsentwicklung adaptiert. Es besteht aus einem speziellen thermostabilen Material, welches Folienhaft dichtgeschweißt und für die HEGEMANN WAAM-Anlage maßgeschneidert hergestellt wurde. Die Dichtheitsprüfung wurde durch das Einblasen von Nebel realisiert. Am Roboterflansch ist die HEGEMANN Eigenentwicklung mittels gasdichtem Drehlager und Überdruckventil angeflanscht, damit das Schutzgas Argon beim Verfahren nicht entweichen kann. Die Spülzeiten für diese Schutzgaseinhausung sind mit kleiner 5 Min im Vergleich zu anderen bekannten Titanschweißanlagen sehr gering. Dabei wird ein Restsauerstoffgehalt von unter 50ppm erreicht, was die geforderten Qualitätsangaben übertrifft. Die Schutzgaseinhausung ist nachfolgend detaillierter dargestellt.

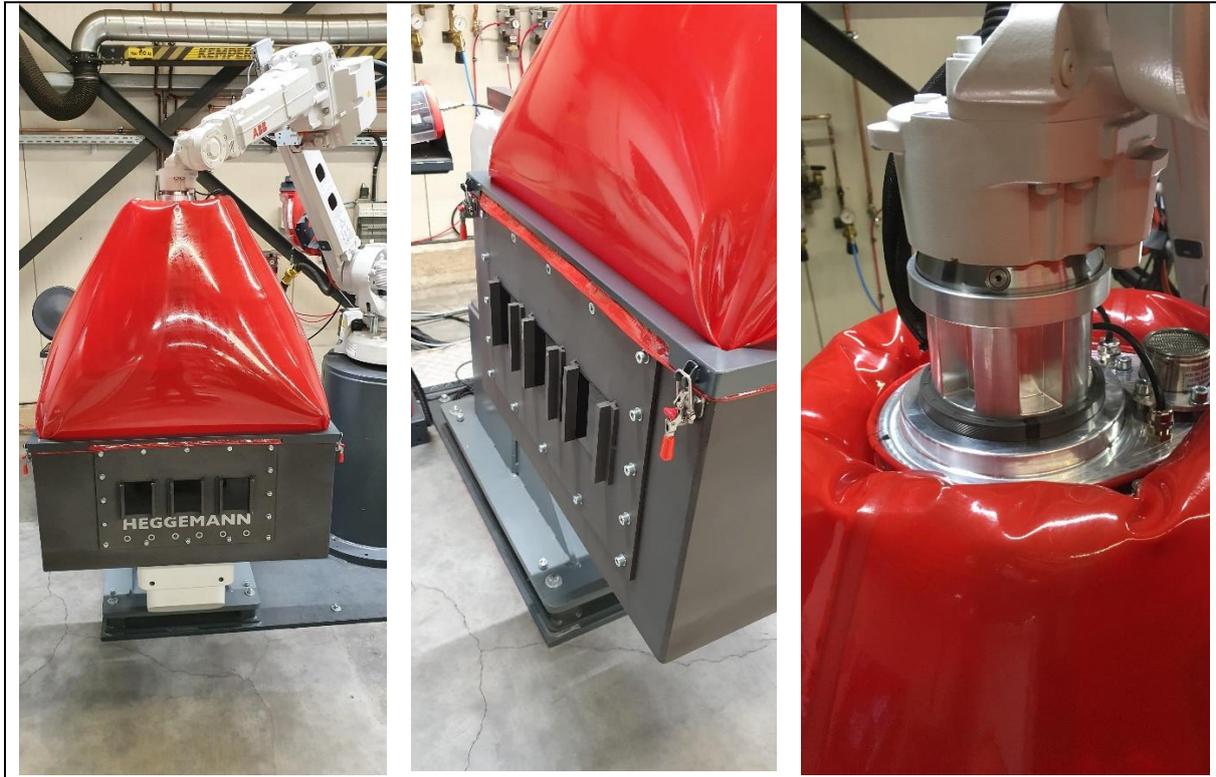


Abbildung 18: Schutzgaseinhausung für Titananwendungen

Die Anlage wurden in mehreren Iterationsschleifen aufgebaut, geändert und optimiert. Für die Implementierung der Robotersteuerung leistete der Hersteller ABB viel Support und ermöglichte die Einbindung in die Open Source Strategie der gesamten Fertigungszelle. Somit konnte in Kooperation mit dem Projektpartner Software Factory die Anlage ohne weitere Probleme vernetzt werden. Dies erfolgte technologisch nach dem Ansatz von IoT und IIoT und ermöglichte den Zugriff auf alle prozessrelevanten Daten.

Eine Änderung zu der WAAM-Anlage des Projektpartners TU München ist die Nutzung einer Thermografiekamera zur Erfassung der Temperaturen im Prozess bei HEGGEMANN. In den entsprechenden Vorversuchen in München hat sich gezeigt, dass die Erfassung und Auswertung der Thermografiedaten komplex und herausfordernd ist. Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die unterschiedlichen Ansätze mittels Thermografiescanner und Thermografiekamera.

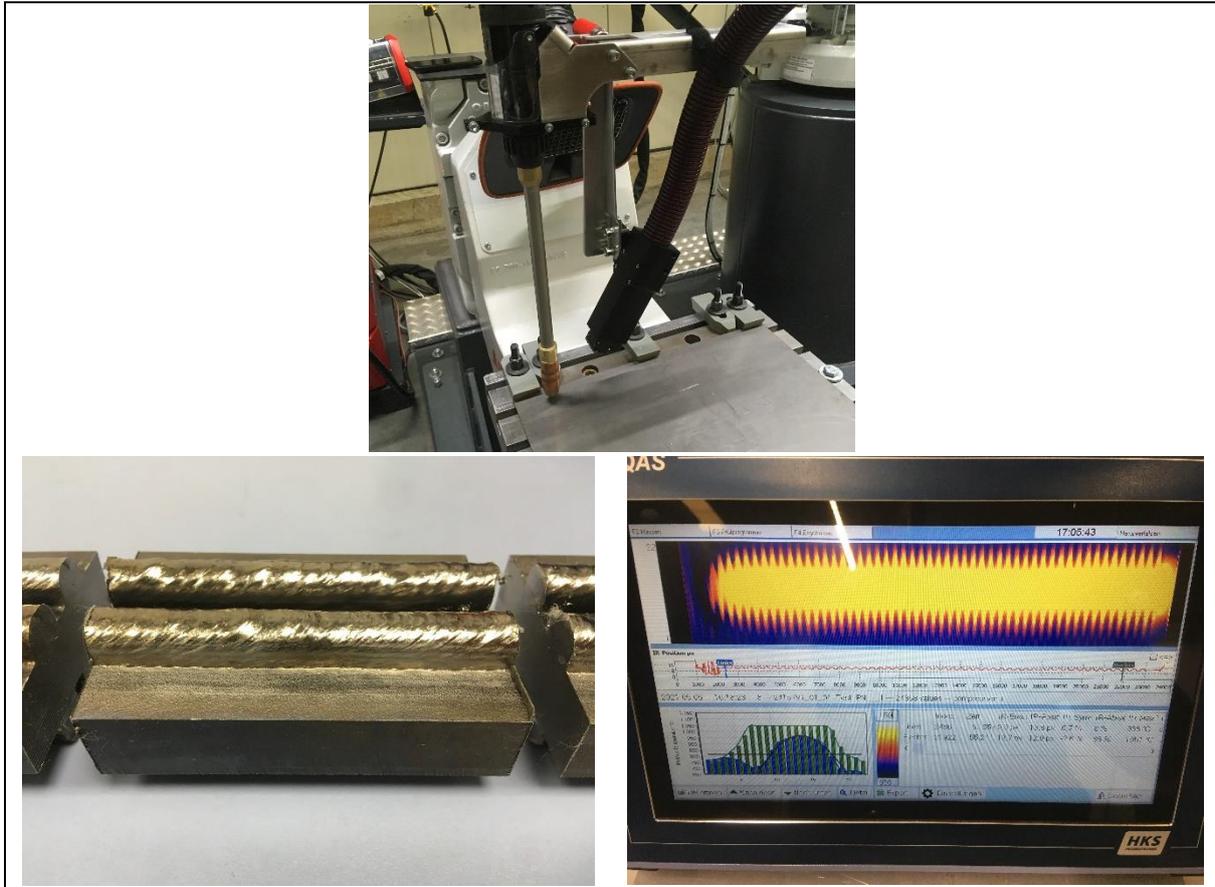


Abbildung 19: Anwendung eines Thermoprofilscanners zur Inline-Temperaturerfassung

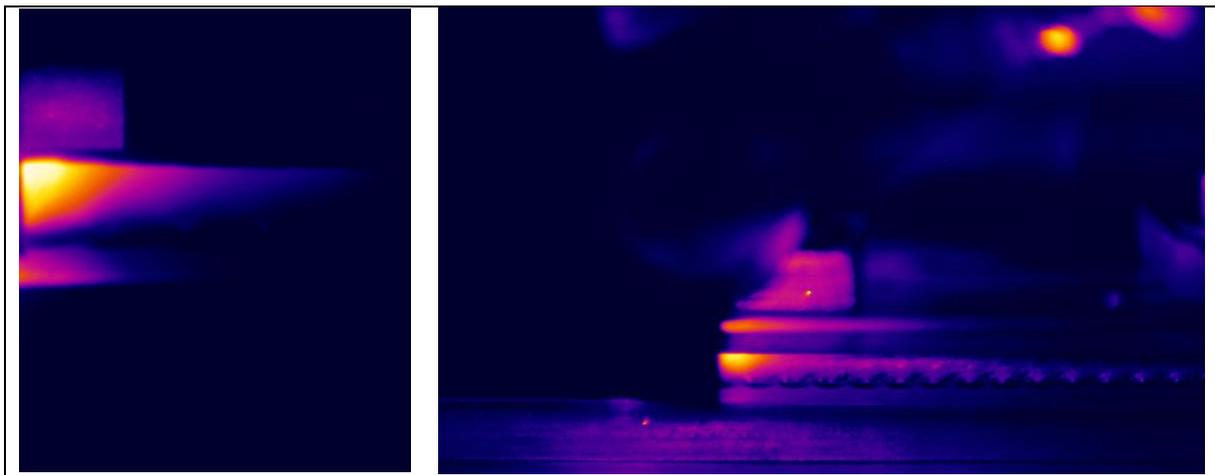


Abbildung 20: Anwendung einer Thermografiekamera zur Inline-Temperaturerfassung

Während die oberen Bilder, die Anwendung des Thermoprofilscanners zeigen, dessen Stärke in den Einzellagen liegt und von der TUM sogar verwendet wurde um Korrelationen zur Höhe anzustellen, eignet sich der Thermoprofilscanner nicht zur Erfassung von Temperaturen, die zur Rückrechnung der  $t_{10/6}$ -Zeit verwendet werden soll. Dafür müsste der Scanner auf eine feste Position ausgerichtet sein, was dem 3-D Ansatz dieser Technologie widerspricht.

Die unteren Bilder in der Abbildung 20 sind mit einer Thermokamera aufgenommen und zeigen die Problematik der Reflektion. So wurde im ersten Schritt die Schutzgaskammer von Metall glänzend in einen matten Farbanstrich geändert, was relativ gesehen zu besseren Ergebnisse führte. Allerdings waren die absoluten Messungen mittels Thermografiekamera u.a. aufgrund der starken Schmauchbildung beim Titanschweißen immer noch nicht präzise genug, so dass entschieden wurde, die Thermografieüberwachung in dieser Form nicht weiter zu verfolgen. HEGGEMANN hat daher im Projekt erfolgreich begonnen, die thermischen Verläufe durch eine thermische Simulation zu ermitteln und mit Thermoelementen eine entsprechende Validierung durchführen.

Mit der Einbindung der Kompetenzen aller Partner konnte die WAAM-Zelle bei HEGGEMANN erfolgreich aufgebaut werden. Somit wurden die Ziele in diesem Arbeitspaket im Rahmen der Projektplanung erreicht.

## AP 6.2 – Integration des CAM-Systems

In diesem Arbeitspaket sollte das CAM-System bei HEGGEMANN in Betrieb genommen werden, um daraus die Schweißsteuerung des WAAM-Prozesses abzuleiten, ebenso wie örtliche Zuordnung der Prozessabsicherung und Dokumentation.

Aufgrund der Integration der WAAM-Anlage in die Fertigungsumgebung bei HEGGEMANN wurde zu Beginn des APs der Stand der Entwicklung im Projekt den am Markt verfügbaren Bahnplanungstools gegenübergestellt. Für die simplen Wandversuche erfolgte die Programmierung der Bahnen direkt am Roboter. Die Umsetzung der komplexeren 3-D Geometrien erfolgte dann mit einem erweiterten Modul einer CAM-Software, die bereits bei HEGGEMANN eingesetzt wurde. Die Gründe waren neben der guten Funktionalität insbesondere die einfache Integration in die Fertigungslandschaft, die bereits vorhandene Erfahrung und Akzeptanz bei der Nutzung der Software sowie die Vereinigung der Programmierung von subtraktiver und additiver Fertigung in einem Unternehmen.

Trotzdem stellte sich die Integration des CAM-Systems als sehr zeitaufwändig heraus, da die Funktionalität in der Praxis noch stark anzupassen war. Dies war dadurch begründet, dass der WAAM-Prozess in der CMT-Roboter-Variante bislang nicht so häufig angewendet wird. Der Fokus des CAM-Software Herstellers (in unserem Fall Fa. OpenMind) lag bis dato auf CNC-Anlagen mit X-, Y- und Z-Verfahreinheiten. Für die Umrechnung kartesischer Koordinaten in Polarkoordinaten war es erforderlich, zwei Postprozessoren zu kombinieren und die Schnittstellen zwischen beiden Lieferanten zu koordinieren.

Nachfolgend sind links die Simulation in HyperMill (Fa. OpenMind) zu sehen und rechts die Umsetzung in RobotMaster (Fa. Robotized). In der Robotersimulation werden die geometrischen Randbedingungen der HEGGEMANN WAAM-Zelle für Kollisionskontrolle und Verfahrbarkeit berücksichtigt.

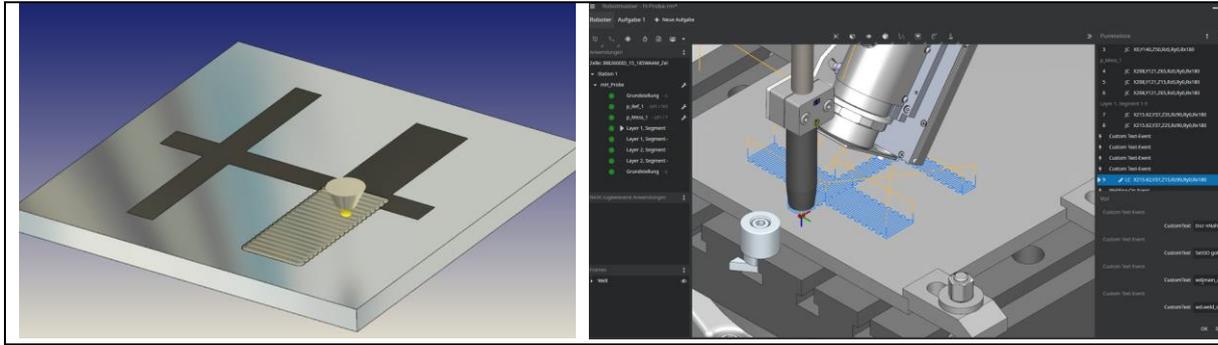


Abbildung 21: CAM-Simulation in Hypermill und Robotersimulation in RobotMaster

Mit der realisierten Kombination von Hypermill und RobotMaster konnte das CAM-System für die WAAM-Anwendung erfolgreich umgesetzt werden. Somit wurden die Ziele des Arbeitspunktes AP 6.2 erreicht.

### AP 6.3 – Inbetriebnahme des Qualitätssicherungstools und der Assistenzsysteme

Das Ziel dieses APs war die Inbetriebnahme der Prozessüberwachung auf Basis der Arbeiten von AP 5.4 und AP 6.1. Dazu wurden ebenfalls entsprechende Simulationsdaten herangezogen. Das Inline-Prozessüberwachungssystem sollte zudem in das Datenmanagementsystem bei HEGGEMANN bzw. bei der Software Factory eingebunden werden. Der Basisaufbau der ThingWorx Plattform der Software Factory ist hierzu nachfolgend einmal visualisiert.

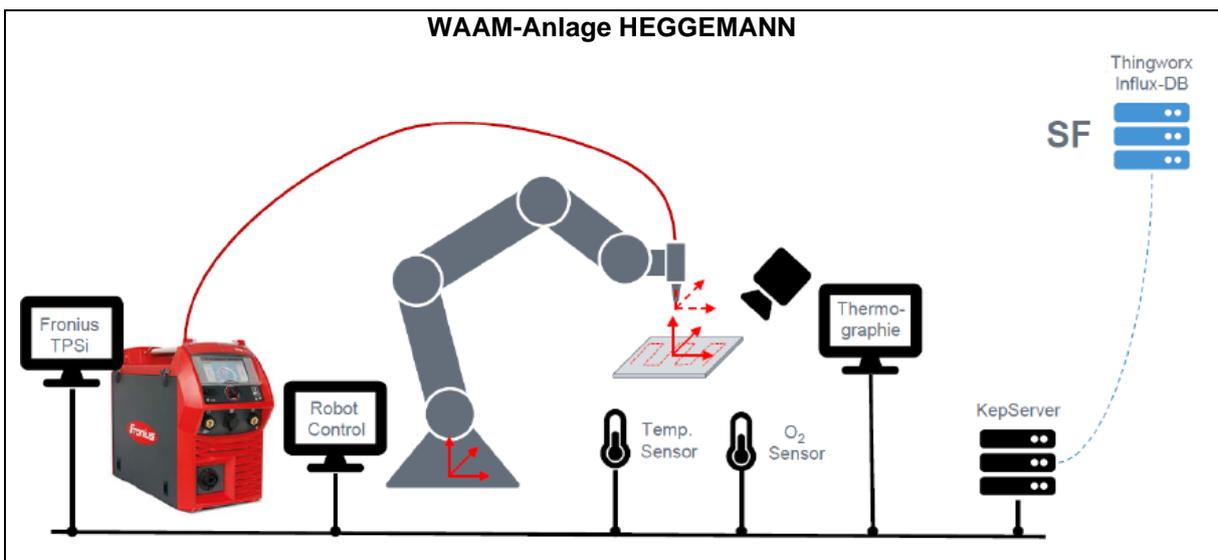


Abbildung 22: ThingWorx Plattform für HEGGEMANN WAAM-Anlage

Für die Realisierung der additiven Bauteilentstehung und aufgrund der dabei zu erwartenden Datenmengen wurde die Datenaufbereitung beginnend mit der Strategie aus dem CAD-Modell heraus umgesetzt. Dafür wurde in der Art und Weise der Layerbildung, wie er auch im Filamentdruck üblich ist, die Geometrie grafisch unterteilt und anschließend in einer Explosionsansicht die Benennung der Strukturen vorgenommen. Diese Benennung wurde für die Digitaldaten mit übernommen und dient als Filter innerhalb der Datenbank, um orts aufgelöste Daten schnell zu finden, zu prüfen, zu visualisieren oder weiter zu verwenden.

Exemplarisch ist das in der folgenden Abbildung zu sehen. Bei der Geometrie handelt es sich um die H-Probe durch einen assoziierten Partner zur Verfügung definiert wurde.



Abbildung 23: Lagenförmiger Aufbau und Bahnplanung der H-Probe

Im Anschluss kann das Bauteil mit dieser Bahnplanung hergestellt werden. Parallel dazu übertragen die Sensoren und vernetzten Komponenten die prozessrelevanten Daten über den KepServer auf die InfluxDB, die als sogenanntes Asset auf der ThingWorx Plattform angelegt wurde. Dabei konnte beispielsweise die InfluxDB ausgelesen werden und in einer browserbasierten Umgebung wie Grafana angezeigt werden. Grafana kann dabei die einzelnen vorher definierten Parameter oder Teile-, Auftrags-, Strukturinformationen nutzen. Es lohnt sich in diesem Zusammenhang auch nicht zeitabhängige Daten zur Filterung in der Datenbank zu verwenden. Dadurch vergrößert sich zwar die Speichergröße, es werden aber kleine Speichergrößen, wie Integer (Ganzzahl) im Vergleich zu Kommazahlen verwendet.

Die folgenden Abbildungen zeigen die mittels dieser entwickelten Systematik aufgezeichneten Daten im WAAM-Prozess bei der Herstellung der H-Probe. Anhand der grünen Punkte ist ersichtlich, dass während der Verfahrensbewegungen des Schweißbrenners durch den Roboter der Lichtbogen aus war.

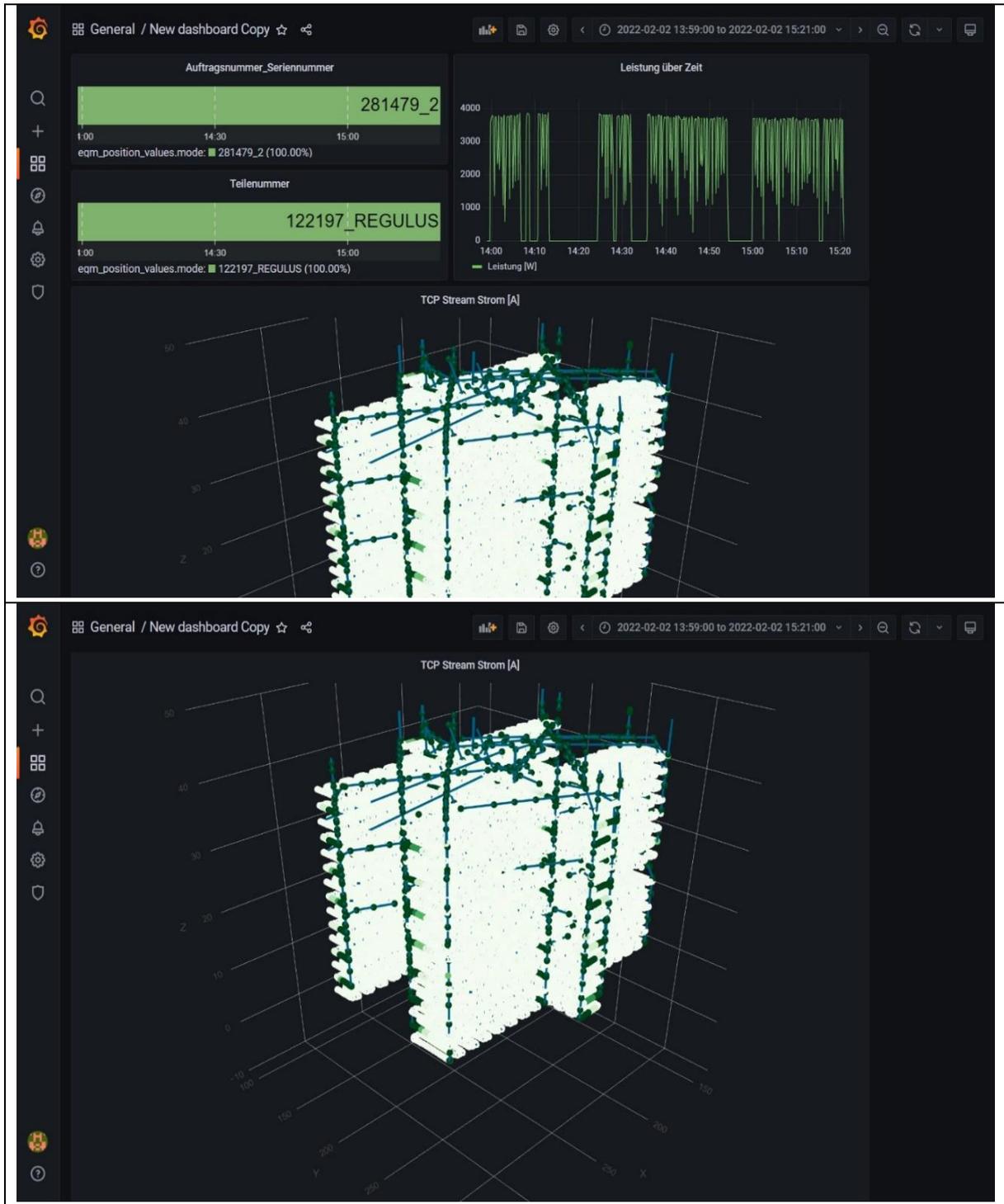


Abbildung 24: Visualisierung des WAAM-Build Jobs der H-Probe in Grafana

Mit diesen Entwicklungsergebnissen wurden die Ziele des Arbeitspunkts 6.3 erreicht.

## AP 6.4 – Additive Fertigung von Realbauteilen und Wärmebehandlung

Das Ziel des Arbeitspakets AP6 6.4 war die Demonstration des prozesssicheren WAAM-Verfahrens im industriellen Umfeld sowie die Fertigung dreidimensionaler Demonstratoren. Dabei sollte der Fokus auf dem Nachweis der Prozesssicherheit nach üblichen Luftfahrtstandards unter Verwendung der im Projektverbund zuvor erarbeiteten Softwaretools und Schnittstellen zur konsistenten Datenverarbeitung liegen.

Das Arbeitspaket AP 6.4 war direkt mit AP 6.3 verknüpft, da die Erfassung von größeren Datenmengen nicht in separaten Versuchen betrachtet werden konnte, sondern direkt mit der definierten bauteilmusterähnlichen Geometrie der H-Probe. Diese H-Probe wurde von einem assoziierten Projektpartner im Hinblick auf typische Herausforderungen bei der Fertigung entsprechender Luftfahrtstrukturen in Abstimmung mit dem Projektkonsortium definiert. So mussten bei der Fertigung unterschiedlichen Wandstärken und entsprechende Kreuzstöße prozesssicher mittels WAMM hergestellt werden.

Für die Herstellung der H-Probe wurde die Pfadgeometrie parametrisch angelegt, wodurch auch im Einfahrprozess und in den Iterationsschleifen diverse Parameter noch auf die aktuellsten Erkenntnisse und Simulationsergebnisse hin angepasst werden konnten. Die Herstellung der finalen Demonstratoren erfolgte dann prozesssicher mit der HEGGEMANN WAAM-Anlage. Abbildung 25 zeigt nachfolgend ein Bild der additiv gefertigten H-Probe in der Schweißkammer.

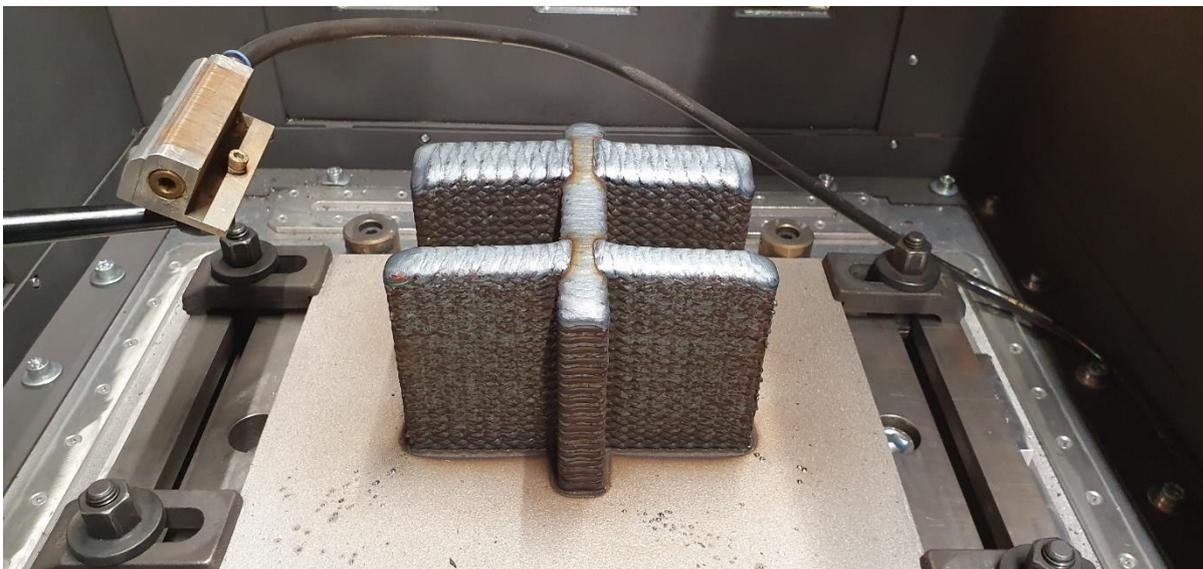


Abbildung 25: bei HEGGEMANN mittels WAAM-Prozess hergestellte H-Probe

Die zeit- und orts aufgelöste Datenerfassung, die Übermittlung auf die InfluxDB sowie die Auswertbarkeit der Daten funktionierte für den gesamten Build Job der H-Probe sehr gut. Nachfolgend ist zum einen ein kleiner Ausschnitt der aufgezeichneten und mittels einer Python Programmierung aufbereiteten Daten dargestellt. In dieser Tabellenform sind die wesentlichen Daten strukturiert lesbar und können für weitere grafische und statistische Auswertungen gut lesbar exportiert werden. Zusätzlich dazu konnten die Aufbaustrategien jedem Layer zugordnet und auch grafisch dargestellt werden, wie in dem unteren Bild zu erkennen ist.

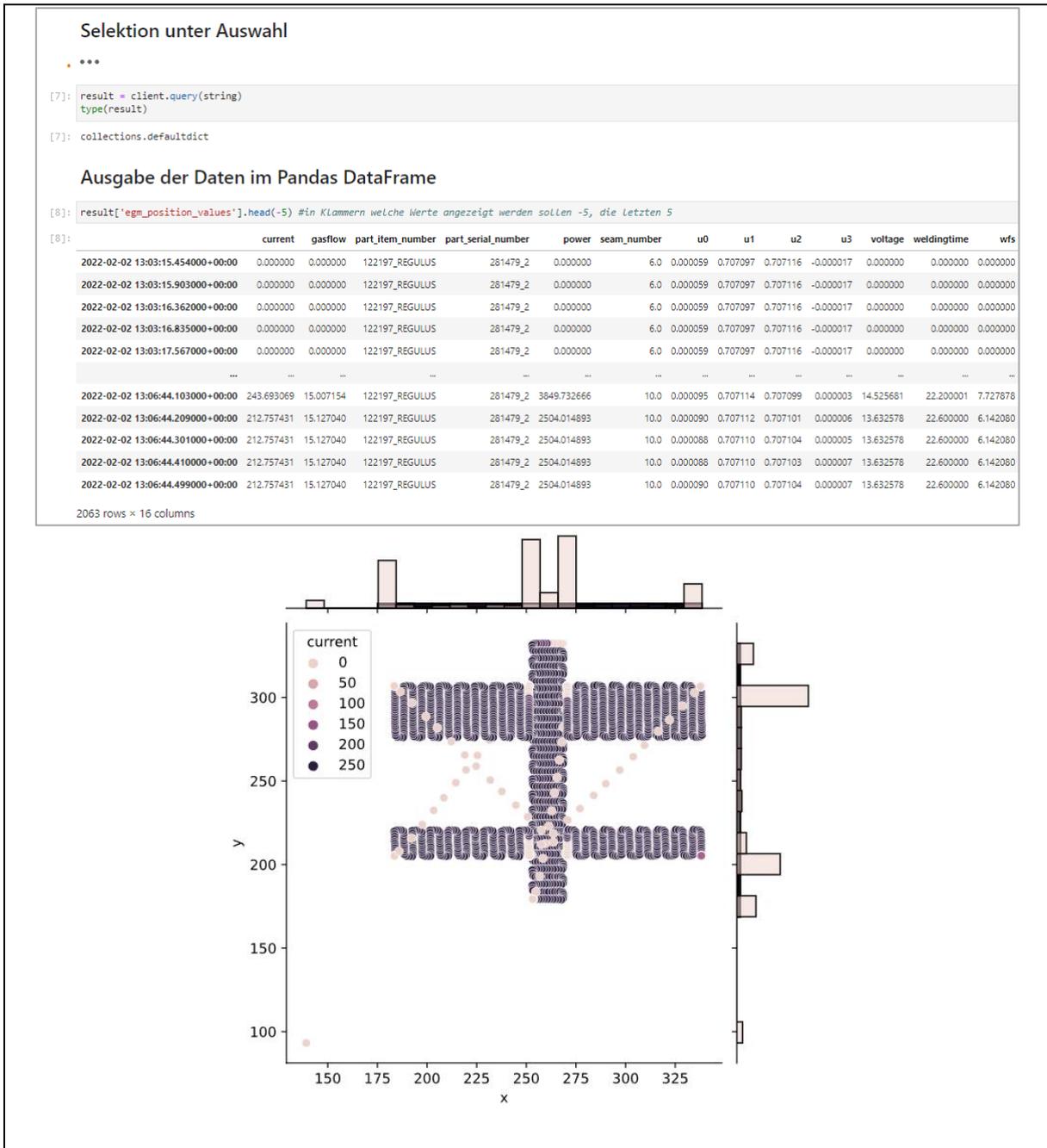


Abbildung 26: Online Daten aus WAAM-Herstellprozess der H-Probe

Durch die hier dargestellten Möglichkeiten der Prozessüberwachung und Dokumentation konnte HEGGEMANN Plausibilitätsprüfungen (hier 1 Layer) durchführen. Mit der fortlaufenden Nummerierung konnte dann die Qualität jeder einzelnen Lage zugeordnet und dokumentiert werden. Daraus ergab sich ein Gesamtbild der Qualität der dreidimensionalen WAAM-Struktur. Durch weitere grafische und statistische Auswertungen konnten auch die ermittelten Prozessgrößen mit den zuvor definierten Anforderungen abgeglichen werden, wie beispielweise Wartezeiten zwischen den Strukturen für die Abkühlung auf 150°C durch Berechnungen in der Datenbank (siehe nachfolgende Abbildung)

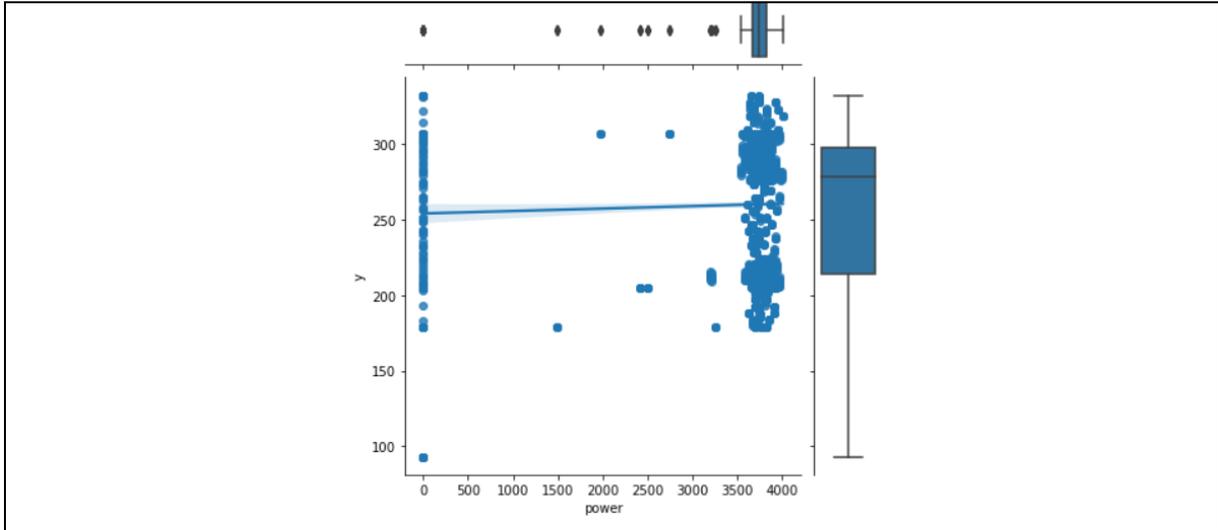


Abbildung 27: Statistische Auswertungen des Herstellprozesses auf Layerbasis – grafisch aufbereitet

Im erfolgreich abgeschlossenen Arbeitspaket konnte HEGEMANN die Prozesssicherheit mittels des umfangreichen und ebenfalls im Projekt entwickelten Qualitätssicherungskonzept anhand der Fertigung der dreidimensionalen H-Probe demonstrieren. Alle Key Values können mit der REGULUS WAMM-Anlage erfasst, übermittelt und dokumentiert werden. Die Temperaturüberwachung erfolgt durch den Abgleich der thermischen Simulation mit realen lokalen Messungen.

Die reproduzierbar erzeugte hohe Qualität der Bauteilgeometrie sowie die erzielten sehr guten technologisch mechanischen Werkstoffeigenschaften der WAAM-Strukturen (siehe Bericht des Projektpartners WW1) belegen die vollumfängliche Zielerreichung der Technologiedemonstration in diesem Arbeitspaket.

## AP 6.6 – Potentialbewertung und Dokumentation

In diesem abschließenden Arbeitspaket sollte HEGGEMANN den erreichten Technologiereifegrad der gesamten REGULUS Prozesskette bewerten und gemeinsam mit den Verbundpartnern entsprechende ökonomische und ökologische Potenziale ableiten. Nachfolgend sind zunächst die Vorteile des von HEGGEMANN maßgeblich entwickelten, realisierten und validierten Anlagenkonzepts mit einer offenen Softwarearchitektur vor dem Hintergrund der Anwendung des WAAM-Verfahrens insbesondere bei KMUs der Luftfahrtlieferkette zusammengefasst. Anschließend werden die ökonomischen und ökologischen Potentiale bewertet.

Das HEGGEMANN WAAM-Anlagenkonzept inkl. Prozessüberwachung zeichnet sich durch folgende Vorteile aus:

- offener Aufbau und Kombination von Standard Komponenten
- deutlicher Preisvorteil von > 350.000 EUR gegenüber kommerziell verfügbarer und CNC-gesteuerter Plug & Play Anlagen
- Erweiterbarkeit für zusätzliche Sensoren
- adaptierbar auf andere Antriebseinheiten und Bewegungselemente, wie Portal, Kran, Linearachse mit Möglichkeiten zur mobilen Anwendung der Technologie
- Universelles Anlagenkonzept: die WAAM-Anlage kann innerhalb kurzer Zeit für Verbindungsschweißanwendungen verwendet werden. Diese Möglichkeit reduziert das Investitionsrisiko in eine neue Technologie wie WAAM
- Prozess ist technologisch offen und erweiterbar bzw. kombinierbar mit Teilprozessen wie z.B. Zwischenlagenrollen. Zudem sind Verfahrenskombinationen des WAMM-Prozesses mit zerspanenden Verfahren, Zwischenlagenhämmern, Laser-Hybrid-Schweißen oder Laser-Pulver-Auftragsschweißen realisierbar.
- einfache Integration der digitalen Prozesskette in KMU IT-Strukturen durch Nutzung offener Softwaremodule
- Möglichkeit der Vernetzung der digitalen WAAM-Prozessketten mit MES-Tools zur Nutzung von Optimierungsansätzen für die Fertigungs- und Energieverbrauchsplanung

Unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten ergeben sich folgende ökonomische Vorteile bei der Kalkulation und Verwendung dieser WAAM-Anlage:

- Deutlich geringerer Maschinenstundensatz durch weniger Investitionsvolumen sowie geringere Folgekosten, wie z.B. Versicherungen, Wartungen etc. Dies wirkt sich insbesondere bei langen Maschinenlaufzeiten auf die RCs aus (geringere Bauteilpreise)
- einfach adaptierbare Größe des Schutzraums durch Zeltkonzept zur Herstellung einer Schutzgasatmosphäre. Dadurch geringer Verlust von Schutzgas bei Spülvorgängen.
- 100% extern programmierbare WAAM-Anlage, die nach erfolgreichem Einfahrprozess sehr personaleffizient zu betreiben ist.

Unter ökologischen Gesichtspunkten ergeben sich folgende Vorteile durch das WAAM-Verfahren und die digitalisierte Anlagentechnik:

- WAAM reduziert den Materialeinsatz signifikant bei der Herstellung entsprechend geeigneter Titanstrukturen. Durch weitere Prozessabsicherungsmaßnahmen können die derzeit noch eingeplanten Aufmaße weiter reduziert werden. Somit würde sich das Buy-to-Fly Ratio noch weiter verbessern. Dadurch wird ebenfalls die CO<sub>2</sub>-Bilanz des Gesamtprozesses verbessert, da diese stark von der CO<sub>2</sub>-Bilanz der Halbzeugherstellung für Titan und Titandraht abhängt.
- Thermische Simulationen und Transparenz bei der Erfassung der Energiebedarfe durch aufgezeichnete Parameter ermöglichen die Optimierung der energetischen Prozess- und Fertigungsplanung
- Möglichkeiten einer zukünftig auch mobilen Nutzung der WAAM-technologie verringern den Teiletourismus und verbessern somit die CO<sub>2</sub>-Bilanz der herzustellenden Strukturbauteile. Evtl. sind auch Nacharbeiten vor Ort möglich, die unter Verwendung der digitalen Möglichkeiten durch einen entsprechend erfahrenen und zertifizierten Herstellbetrieb online überwacht werden

Somit kann abschließend festgestellt werden, dass die nach 4,5 Jahren erfolgreich abgeschlossenen Arbeiten zur Entwicklung einer digitalen und prozesssicheren WAAM-Fertigungskette im REGULUS Projekt viel Potential haben, auch bei Erfüllung der hohen Qualitätsstandards entsprechende ökonomische und ökologische Vorteile für einen nachhaltige und wirtschaftliche Luftfahrt zu generieren.

## 7. Zusammenfassung der Projektergebnisse

In dem abgeschlossenen Innovationsvorhaben REGULUS wurde gemeinschaftlich im Projektverbund ein lichtbogenbasiertes Verfahren zur additiven Herstellung von Titan-Bauteilen unter Berücksichtigung luftfahrttechnischer Qualitätsanforderungen entwickelt und erfolgreich erprobt. HEGGEMANN war dabei für die luftfahrttechnische Qualitätsabsicherung sowie für den Aufbau und die Erprobung des Titan-Schweißprozesses im industrienahen Umfeld verantwortlich.

Im vorherigen Kapitel sind die gelösten Herausforderungen, die erarbeiteten Projektergebnisse, die in Hard- und Software realisierte Anlagentechnik sowie die additiv gefertigten Technologiedemonstratoren ausführlich beschrieben und dargestellt. Die folgenden beiden Abbildungen zeigen noch einmal zusammengefasst die im Rahmen der 52-monatigen Projektlaufzeit entstandene WAAM-Zelle sowie einen ausgewählten Verfahrensdemonstrator zur Darstellung der erzielbaren sehr guten Schweißqualität.

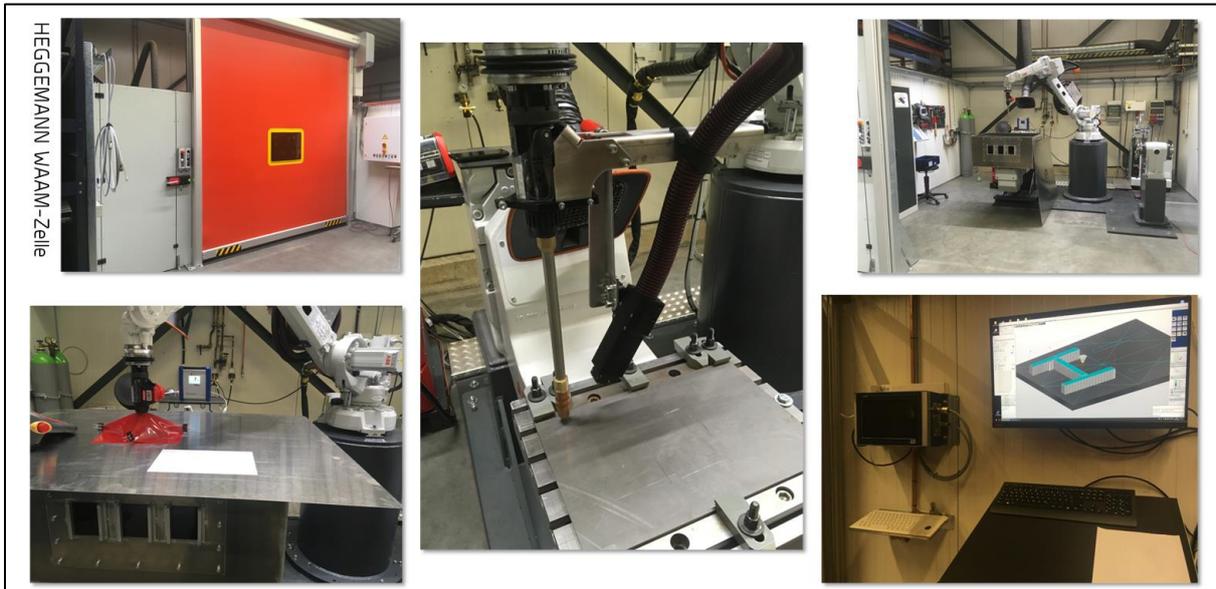


Abbildung 28: Realisierte REGULUS-WAAM-Zelle bei der HEGGEMANN AG



Abbildung 29: WAAM-Demonstrator der HEGGEMANN AG zur Darstellung der sehr hohen Schweißqualität

Somit kann festgestellt werden, dass das erste HEGGEMANN zugeordnete Projektziel des Verbundvorhabens, der Aufbau einer ortsübergreifenden und digital vernetzten Fertigungskette, welche die luftfahrtüblichen Qualitätsstandards erfüllt, vollumfänglich erreicht wurde.

Als zweites der HEGEMANN AG zugordnetes Ziel des Verbundprojekts sollte der Funktionsnachweis der lichtbogenbasierten additiven Fertigung im industriellen und nach Luftfahrtstandards zertifizierten industriellen Umfeld erbracht werden. Die Reife der im Projekt entwickelten und demonstrierten Prozessroute sollte durch die Fertigung eines Realbauteil mit dem Technologiereifegrad 8 (Qualifiziertes System mit Nachweis der Funktionstüchtigkeit im Einsatzbereich) nachgewiesen werden.

Der Funktionsnachweis der Technologie wurde durch die auf der eigenen WAAM-Anlage entstandenen Demonstratoren in hoher Qualität inkl. vorher simuliertem Prozessablauf erbracht. Das Ziel, den Prozess anhand von Realbauteilen bis zum Technologischen Reifegrad 8 zu entwickeln, konnte aber aufgrund der sich im Projektverlauf ergebenden Anzahl und Komplexität an Herausforderungen zur Prozessabsicherung nicht ganz erreicht werden.

Nach international gültiger Definition der TRLs in Anlehnung an die TRL-Definition der NASA ([http://esto.nasa.gov/files/trl\\_definitions.pdf](http://esto.nasa.gov/files/trl_definitions.pdf)) ist die TRL-Stufe 8 wie folgt beschrieben:

#### TRL 8:

*„Qualifiziertes System mit Nachweis der Funktionstüchtigkeit im Einsatzbereich Systementwicklung beendet. Vollständige Integration in die betriebliche Hardware und Softwaresysteme. Großteil der Benutzerdokumentation, Ausbildungsdokumentation und Wartungsdokumentation sind verfügbar. Das System wurde funktionsgeprüft in simulierten und Betriebsszenarien. Verifizierung und Validierung abgeschlossen.“*

Da der Nachweis der Funktionstüchtigkeit noch nicht beendet ist und die Betriebsszenarien im Rahmen der REGULUS Zeit- und Kostenplanung nicht vollumfänglich funktionsgeprüft und validiert werden konnten, wurde der Reifegrad der Prozessentwicklung zum Ende des Projekts einvernehmlich mit allen Projektpartnern mit TRL 7 definiert. Laut o.g. Quelle ist TRL 7 dabei wie folgt beschrieben:

#### TRL 7:

*„Prototyp im Einsatz Demonstration des Versuchsaufbaus im betrieblichen Umfeld. System ist beinahe maßstabsgetreu zum betrieblichen Umfeld. Die meisten Funktionen für Demonstration und Test sind vorhanden. Gut integriert mit dem Sicherheits- und Hilfssystem. Begrenzte Dokumentation verfügbar.“*

Der Fokus der Entwicklungsarbeiten von HEGEMANN lag auf dem „Quality First-Ansatz“ im Hinblick auf die erreichbare Materialqualität. Die Projektergebnisse des Verbundpartners WW1 zeigen eindrucksvoll die hohe Güte des mit dem WAAM-Prozess aus Draht erzeugten Titanmaterials. Die bekannten Anforderungen für strukturell verwendete Titanlegierungen (Grade 5) werden bzgl. der Mikrostruktureigenschaften und der technologisch mechanischen Eigenschaften erfüllt. Dies bestätigt insbesondere auch BOEING als OEM und assoziierter Projektpartner im Verbundvorhaben.

Mit dem erfolgreichen REGULUS Projektabschluss wurde der Stand der Technik hinsichtlich der Anwendung des WAAM-verfahrens für Luftfahrtanwendungen deutlich erweitert. Verwertungspotentiale und eine wissenschaftliche sowie technische Anschlussfähigkeit sind dabei gegeben.

## 8. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Im Verbundprojekt REGULUS wurden die bei Projektbeantragung veranschlagten und bewilligten Kosten von HEGGEMANN zu 95% verbraucht. Die verbleibenden 5% konnten trotz der sechsmonatigen Verlängerung der Projektlaufzeit aufgrund der Auswirkungen der Corona Pandemie in den Jahren 2020 und 2021 mit Kurzarbeit und hohen Krankenständen nicht abgerufen werden.

Bei HEGGEMANN war zur Erreichung der ambitionierten Projektziele und Umsetzung des vielschichtigen Arbeitsplans der Einsatz umfangreicher Personalkapazitäten erforderlich. Somit sind die Personalkosten die mit Abstand größte Position des zahlenmäßigen Nachweises (94%).

Die kalkulierten Personalkosten wurden über die Projektlaufzeit von 52 Monaten zu 95% abgerufen. Materialkosten wurden dagegen um 4,7% überbucht, während die sonstigen unmittelbaren Vorhabenkosten zu 91,2% abgerufen wurden. Die Reisekosten wurden ebenfalls bedingt durch die pandemische Lage trotz der Laufzeitverlängerung bis Mitte 2022 nur zu 84% abgerufen, obwohl bereits mit der kostenneutralen Laufzeitverlängerung um sechs Monate eine Umwidmung von Reisekosten in Höhe von 2.000 EUR zu Materialkosten beantragt und bewilligt worden ist.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass der Eigenanteil der HEGGEMANN AG sowie die Zuwendungen des BMWK im Sinne des LuFo-Förderprogramms und der Bewilligungsbescheide für dieses erfolgreich abgeschlossene Verbundvorhaben eingesetzt wurden.

## 9. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Mit dem erfolgreich abgeschlossenen Innovationsvorhaben wurde bei HEGEMANN eine vernetzte und damit vollumfänglich digital darstellbare Fertigungsprozesskette für die prozesssichere additive Fertigung von endkonturnahen Titanhalbzeugen entwickelt und im industriellen Umfeld erprobt. Für das lichtbogenbasierte Schweißverfahren, dem sogenannten Wire & Arc Additive Manufacturing (WAAM) wurden neben der eigentlichen Anlagentechnik auch eine digital gestützte Prozessabsicherung entwickelt, implementiert bzgl. der erreichbaren Werkstoffigenschaften validiert. Übergeordnetes Ziel war die Erhöhung der Energie- und Materialeffizienz im Vergleich zu etablierten Zerspanungsverfahren „aus dem Vollen“.

Um diese ambitionierten Zielvorgaben gemeinsam mit den weiteren Projektpartnern zu erreichen, wurde ein detaillierter Arbeitsplan erstellt und über den Projektverlauf in enger Abstimmung mit dem Projektträger und allen Partnern abgearbeitet und im Rahmen von Review-Meetings nachgeschärft. Auf Basis des erarbeiteten Projektfortschritts und dem damit einhergehenden Kenntnissgewinn wurde der Fokus der Arbeiten bei HEGEMANN im Projektverlauf ebenfalls in Absprache mit dem Projektträger und den Verbundpartnern immer stärker auf das Thema „Prozess- bzw. Qualitätsabsicherung“ gelegt. Hierbei konnte die jahrzehntelange Erfahrung von HEGEMANN als Luftfahrt zugelassener Herstellbetrieb und die ebenfalls langjährige Expertise im Schweißen erfolgreich in das Projekt eingebracht werden. Die dabei zahlreich zu lösenden technischen Herausforderungen und die pandemiebedingten Verzögerungen führten dann auch zu der kostenneutralen Verlängerung der Projektlaufzeit um sechs Monate. Die letztendlich sehr positiven Ergebnisse hinsichtlich der erreichten Werkstoffqualität, der Funktionalität der HEGEMANN WAAM-Anlage und der Simulierbarkeit dieses hochdynamischen Prozesses zeigen, dass die getroffenen Entscheidungen im Projektverlauf richtig und zielführend waren.

Für HEGEMANN stellen die Ergebnisse des REGULUS Projekts in Bezug auf den Werkstoff Titan und das Thema „Additive Fertigung“ einen großen Innovationssprung sowie einen umfassenden Kenntniszuwachs in Richtung einer digitalisierten Fertigungsumgebung dar. Derart additiv aufgebaute endkonturnahe Titanstrukturen konnten zuvor weder bei HEGEMANN noch bei anderen Unternehmen in einem idealisierten industriellen Prozess in derart guter Materialqualität hergestellt werden. Zudem gab es zu Projektbeginn keine effiziente thermische Simulation des Prozesses. Das hohe Entwicklungsrisiko und der immense Aufwand insbesondere bezogen auf das im Projekt eingebundene Personal wären für HEGEMANN als internes Innovationsprojekt mit eigenen Mitteln ohne die öffentliche Förderung nicht ansatzweise durchführbar gewesen!

## 10. Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere bzgl. Verwertbarkeit der Ergebnisse

Die Projektbeantragung mit den formulierten Zielen basierte auf der Motivation, die Möglichkeiten des Lichtbogenbasierten Schweißens auch zur Herstellung endkonturnaher Titanstrukturen zu nutzen, was eine deutliche Reduzierung des Energie- und Materialbedarfs gegenüber dem Stand der Technik bedeutet. Die zuvor beschriebenen Projektergebnisse zeigen, dass entsprechende Halbzeuge aus hochfesten Titanlegierungen in Luftfahrtqualität herstellbar sind. Erste Kooperationen mit Kunden und Partnern zur Nutzung von WAAM wurden in 2022 gestartet (Otto Fuchs, Rolls Royce) bzw. werden auch im Rahmen weiterer Entwicklungskooperationen fortgesetzt (BOEING). Darüber hinaus ist eine Machbarkeitsstudie eines Triebwerks Herstellers aktuell in Anfrage.

Ein weiterer -großer Nutzen des REGULUS Projekts liegt für HEGGEMANN in der Bedeutung als interner „Digitalisierungs-Enabler“: Dank der im Projekt über mehr als vier Jahre gemeinschaftlich erarbeiteten und erprobten Erkenntnisse zur digitalen Prozesskette, inkl. Anforderungen an entsprechende Schnittstellen, Datenerfassung, Sicherung und Aufbereitung dieser Daten konnte HEGGEMANN weitere kommerzielle und öffentlich geförderte F&E-Projekte gewinnen und die unternehmensweite Digitalisierung vorantreiben. Gerade mit Hinblick auf die Schaffung von mehr Transparenz auf unterschiedlichen Steuerungsebenen konnten die Lösungsansätze aus REGULUS adaptiert werden.

Für die Weiterführung der Prozesssimulation wird im Engineering zum 1.1.2023 ein neuer Mitarbeiter fest eingestellt.

Nach dem erfolgreichen Projektabschluss mit einem Technologiereifegrad von 7 müssen bei HEGGEMANN zur kommerziellen Anwendung die Industrialisierung bis zur Serienreife und Erteilung der notwendigen Zulassungen erarbeitet werden. Ab Mitte/ Ende 2024 ist dann die Produktion erster mit dem neuartigen Verfahren hergestellter Bauteile „in Kleinserie“ geplant. Gerade bei der Preisentwicklung von hochwertigen Legierungen wie Titan Grade 5 innerhalb der letzten zwei Jahre ist der Hebel eines energie- und materialeffizienten Herstellungsverfahrens, welches das Zerspanen aus dem Vollen z.T. substituieren könnten, sehr groß und es ist mit einer hohen Marktdurchdringung zu rechnen. Bei ein oder zwei von HEGGEMANN gewonnenen Serienprojekten mit WAAM-Stückzahlen von größer hundert Stück pro Jahr, werden Neueinstellungen in den Bereichen der Konstruktion, der Programmierung sowie der Qualitätssicherung erforderlich. Die Umsetzung der Technologie erfolgt am Standort der HEGGMANN AG in Büren.

Der Verwertungsplan gemäß der Vorhabenbeschreibung von HEGEGEMANN wird durch die sechsmonatige Verlängerung der Projektlaufzeit und durch die Folgen der Beschaffungs- und Energiekrise parallel um ca. 9 - 12 Monate verschoben, ist aber bzgl. der geplanten Umsatz- und Mitarbeiterzuwächse auf Basis der REGULUS Projektergebnisse noch aktuell.

## 11. Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Während der Durchführung des Verbundvorhabens konnte ein zunehmendes Interesse im Bereich der kommerziellen Luft- und Raumfahrt und damit einhergehend eine zunehmende Zahl an Veröffentlichungen beobachtet werden (siehe Kap. 4.2).

Während der Durchführung des Vorhabens ist bei HEGGEMANN projektbegleitend und kontinuierlich der Stand der Technik zur additiven Herstellung von hochfesten Titanstrukturen recherchiert worden. Dabei ist aber kein inhaltlicher Fortschritt bei anderen Stellen außerhalb des Projektkonsortiums weder auf diesem Gebiet noch auf dem Gebiet der Simulation dieses Prozesses bekannt geworden. Lediglich im Bereich der Normen und Prozessvorgaben sind während der Laufzeit einige neue Quellen dazugekommen, die aber von HEGGEMANN bei den Konzepten zur Qualitätssicherung des REGULUS-Prozesses kontinuierlich berücksichtigt worden sind.

## 12. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr.11

Die Veröffentlichung aller wesentlichen REGULUS-Projektergebnisse des Teilprojekts von HEGGEMANN erfolgt erstmalig mit der Veröffentlichung dieses Abschlussberichts.

Werkstoffwissenschaftliche Ergebnisse aus der ersten Projektphase wurden in einer gemeinschaftlichen Veröffentlichung der Verbundpartner unter Federführung des Projektpartners WW1 im Jahr 2020 veröffentlicht:

*D. Elitzer, H.W. Höppel, M. Göken, D. Baier, C. Fuchs, H. Bähr, T. Meyer, A. Gallasch, Influence of wire arc additive manufacturing of Ti-6Al-4V on microstructure and mechanical properties for potential large-scale aviation parts, MATEC Web Conf. 321 (2020) 03037. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202032103037>.*

Darüber hinaus werden ab Anfang 2023 ausgewählte Projektergebnisse auf der Homepage der HEGGEMANN AG ([www.heggemann.com](http://www.heggemann.com)) präsentiert und für Unterlagen zur kommerziellen Verwertung aufbereitet. Weitere Veröffentlichungen in marktbezogenen Fachzeitschriften erfolgen nach erfolgreicher Industrialisierung und Zulassung des Prozesses im Verlauf 2024 ff.

## Anhang

- Berichtsblatt
- Document Control Sheet

Büren, 29.9.2022



Dr. Thomas Meyer  
- Projektleiter -

## Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN geplant	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel Schlussbericht zum Innovationsvorhaben der HEGGEMANN AG „REGULUS“– Ressourceneffiziente Fertigung von großvolumigen Luftfahrt-Strukturelementen“  Teilprojekt: Entwicklung, Qualifizierung und Realisierung der vernetzten Prozesskette unter Berücksichtigung der luftfahrttechnischen Qualitätsstandards bei idealisierten industriellen Einsatzbedingungen	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Meyer, Dr. Thomas	5. Abschlussdatum des Vorhabens Juni 2022
	6. Veröffentlichungsdatum Geplant für Oktober 2022
	7. Form der Publikation Schlussbericht
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) HEGGEMANN AG Zeppelinring 1-6 33142 Büren	9. Ber. Nr. Durchführende Institution -
	10. Förderkennzeichen 20W1709B
	11. Seitenzahl 56 Seiten
12. Fördernde Institution (Name, Adresse)  Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 53107 Bonn	13. Literaturangaben 17
	14. Tabellen 4
	15. Abbildungen 29
16. Zusätzliche Angaben -	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) Projekträger Luftfahrtforschung im Auftrag des BMWK   Königswinterer Str. 522-524   53227 Bonn, September 2022	
18. Kurzfassung Im Teilprojekt „Entwicklung, Qualifizierung und Realisierung der vernetzten Prozesskette unter Berücksichtigung der luftfahrttechnischen Qualitätsstandards bei idealisierten industriellen Einsatzbedingungen“ hat HEGGEMANN eine voll funktionsfähige WAAM-Zelle (Wire & Arc Additive Manufacturing) für die lichtbogenbasierte Herstellung von Titanhalbzeugen nach luftfahrttechnisch etablierten Qualitätsstandards entwickelt und aufgebaut. Der Funktionsnachweis im industrienahen und nach Luftfahrtstandards zertifizierten Umfeld wurde dann anschließend ebenfalls am Standort von HEGGEMANN in Büren erbracht.  Neben der Entwicklung des eigentlichen WAAM-Prozesses stellen die erfolgreiche Vernetzung von Anlagenkomponenten und die verifizierte digitale Prozessüberwachung wesentliche Ergebnisse des Vorhabens für HEGGEMANN dar. Mit den erarbeiteten Kenntnissen zum Aufbau der digitalen Prozesskette, inkl. Implementierung entsprechender Sensoren, Softwaretools, Hard- und Software-schnittstellen sowie mit dem entwickelten Know How bzgl. der Sicherung und Auswertung großer Datenmengen des additiven Prozesses hat sich HEGGEMANN eine Position erarbeitet, um die unternehmensweite Digitalisierung proaktiv voranzutreiben und auszubauen.  Zusammenfassend wurde im REGULUS Projekt der Stand der Technik bzgl. der lichtbogen- und drahtbasierten additiven Herstellung von Titanstrukturen für Luftfahrtanwendungen signifikant erweitert. Im REGULUS-Projekt wurden Fähigkeiten und Kompetenzen entwickelt und erarbeitet, die im globalen Marktumfeld die Wettbewerbsposition eines mittelständischen Unternehmens wie die HEGGEMANN AG am Standort Deutschland langfristig und nachhaltig stärken. Mit den erreichbaren Materialeinsparungen liefert das Vorhaben einen wesentlichen Beitrag zum förderpolitischen Ziel 3 (leistungsfähige und effiziente Luftfahrt) innerhalb der Programmlinie „Technologie“ im Rahmen des dritten Aufrufs im fünften nationalen zivilen Luftfahrtforschungsprogramm.	
19. Schlagwörter WAAM, Additive Fertigung, Titan, Schweißen, Luftfahrt, Qualität, Digitale Prozesskette	
20. Verlag -	21. Preis -

## Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN planned	2. type of document (e.g. report, publication) Final report
3. title Final report on the innovation project of the HEGGEMANN AG "REGULUS"- Resource efficient manufacturing of large volume aerospace structural elements".  Subproject: Development, qualification and realization of the connected process chain taking into account the aeronautical quality standards under idealized industrial operating conditions.	
4. author(s) (family name, first name(s)) Meyer, Dr. Thomas	5. end of project June 2022
	6. publication date planned for October 2022
	7. form of publication Final report
8. performing organization(s) (name, address) HEGGEMANN AG Zeppelinring 1-6 33142 Büren	9. originator's report no.
	10. reference no. 20W1709B
	11. no. of pages 56 pages
12. sponsoring agency (name, address)  Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 53107 Bonn	13. no. of references 17
	14. no. of tables 4
	15. no. of figures 29
16. supplementary notes	
17. presented at (title, place, date) Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) Projekträger Luftfahrtforschung im Auftrag des BMWK   Königswinterer Str. 522-524   53227 Bonn, September 2022	
18. abstract In the sub-project "Development, qualification and realization of the networked process chain taking into account aeronautical quality standards under idealized industrial operating conditions", HEGGEMANN developed and set up a fully functional WAAM (Wire & Arc Additive Manufacturing) plant for the arc-based production of titanium semi-finished products in accordance with established aerospace quality standards. The functional verification in an industrial environment certified according to aerospace standards was then also carried out at the HEGGEMANN site in Büren.  In addition to the development of the actual WAAM process, the successful interconnection of plant components and the verified digital process monitoring represent significant results of the project for HEGGEMANN. With the knowledge gained in the development of the digital process chain, including the implementation of appropriate sensors, software tools, hardware and software interfaces, as well as the know-how developed with regard to the backup and evaluation of large amounts of data from the additive process, HEGGEMANN has established a position in which it can proactively drive forward and expand company-wide digitization.  In summary, the REGULUS project has significantly advanced the state of the art in arc and wire-based additive manufacturing of titanium structures for aerospace applications. In the REGULUS project, skills and competences were developed and elaborated which strengthen the competitive position of a medium-sized company such as HEGGEMANN AG in Germany in the long term and sustainably in the global market environment. With the achievable material savings, the project makes a significant contribution to the funding policy objective 3 (high-performance and efficient aviation) within the program line "Technology" within the framework of the third call in the fifth national civil aviation research program.	
19. keywords WAAM, additive manufacturing, titanium, welding, aerospace, quality, digital process chain	
20. publisher	21. price