

SCHLUSSBERICHT

zum Innovationsvorhaben der HEGGEMANN AG

„**QuSAM**“ – Qualitätssichere Skalierbarkeit des WAAM-Prozesses zur
Herstellung von Luftfahrtstrukturkomponenten

Teilprojekt:

Entwicklung und Implementierung eines digitalen Zwillings entlang der
additiven Prozesskette

Förderkennzeichen: 20Q2121A

im Rahmen des 2. Aufruf des Luftfahrtforschungsprogramms VI (LuFo VI-2)

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Laufzeit des Vorhabens: 01.04.2022 – 30.09.2025

Zuwendungsempfänger:

HEGGEMANN AG

Zeppelinring 1-6

33142 Büren

Autoren: Dr. Thomas Meyer
Sascha Berbalk

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.....	9
4.1 Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden.....	10
4.2 Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste.....	10
5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	12
Eingehende Darstellung der Projektergebnisse.....	13
6. Verwendung der Zuwendung und Darstellung der erzielten Ergebnisse im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele.....	13
HAP 0 – Projekt- und Anforderungsmanagement.....	14
HAP 1 – Qualitätssichere Skalierbarkeit des WAAM-Prozesses.....	14
HAP 2 – Implementierung digitaler Zwilling.....	24
HAP 3 – Vernetzung digitaler Zwillinge mit Fertigungsschritten und Realbauteilen.....	36
HAP 4 - Steigerung der Prozesssicherheit und Effizienz durch horizontal digitalisierte Prozesskette.....	40
7. Zusammenfassung der Projektergebnisse.....	50
8. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises.....	51
9. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	52
10. Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere bzgl. Verwertbarkeit der Ergebnisse.....	53
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.....	56

1. Aufgabenstellung und Projektziele

Im Projekt QuSAM wurde eine skalierbare und durchgängig digitalisierte Prozesskette zur additiven Fertigung großdimensionierter Titan-Strukturbauteile für die Luftfahrt untersucht und weiterentwickelt. Aufbauend auf den im Vorgängerprojekt REGULUS gewonnenen Erkenntnissen wurde das WAAM-Verfahren (Wire Arc Additive Manufacturing) gezielt weiterentwickelt, um endkonturnahe Titanbauteile mit hoher Materialeffizienz, reduziertem Zerspanungsanteil und luftfahrtgerechter Bauteilqualität herstellen zu können.

Durch die Kombination additiver Fertigung mit anschließender spanender Endbearbeitung sollte der Materialeinsatz gegenüber konventionell subtraktiven Fertigungsrouten deutlich reduziert und die Ressourceneffizienz gesteigert werden. Gleichzeitig wurde eine Reduzierung der Herstellkosten angestrebt. Ein weiterer Schwerpunkt lag auf der durchgängigen digitalen Abbildung der Prozesskette sowie der Übertragbarkeit und Skalierbarkeit der entwickelten Ansätze auf industrielle Anwendungen im Luftfahrtkontext.

Nachfolgend sind die sechs übergeordneten Projektziele (Verbundziele) dieses Innovationsvorhabens aufgeführt:

1. Reduktion des Titan-Materialeinsatzes bei der Herstellung von Strukturbauteilen um mindestens 50 % gegenüber rein subtraktiven Fertigungsverfahren, abhängig von der jeweiligen Bauteilgeometrie.
2. Identifikation von Kosteneinsparpotenzialen bei der Bauteilherstellung von bis zu 50 % im Vergleich zum Stand der Technik (Zerspanung aus dem Vollen).
3. Steigerung der Ressourceneffizienz und Verbesserung der CO₂-Bilanz durch Verringerung des Anteils energieintensiv hergestellter Titanhalbzeuge.
4. Entwicklung einer skalierbaren, durchgehend digitalisierten Prozesskette zur additiven und hybriden Fertigung von Titanstrukturen für die Luftfahrt.
5. Nachweis der industriellen Umsetzbarkeit innerhalb der Projektlaufzeit auf Basis eines strukturierten Arbeitsplans mit definierten Verantwortlichkeiten und Meilensteinen.
6. Berücksichtigung luftfahrtspezifischer Zulassungsanforderungen und Unterstützung der Bewertung durch Einbindung des assoziierten Industriepartners Boeing.

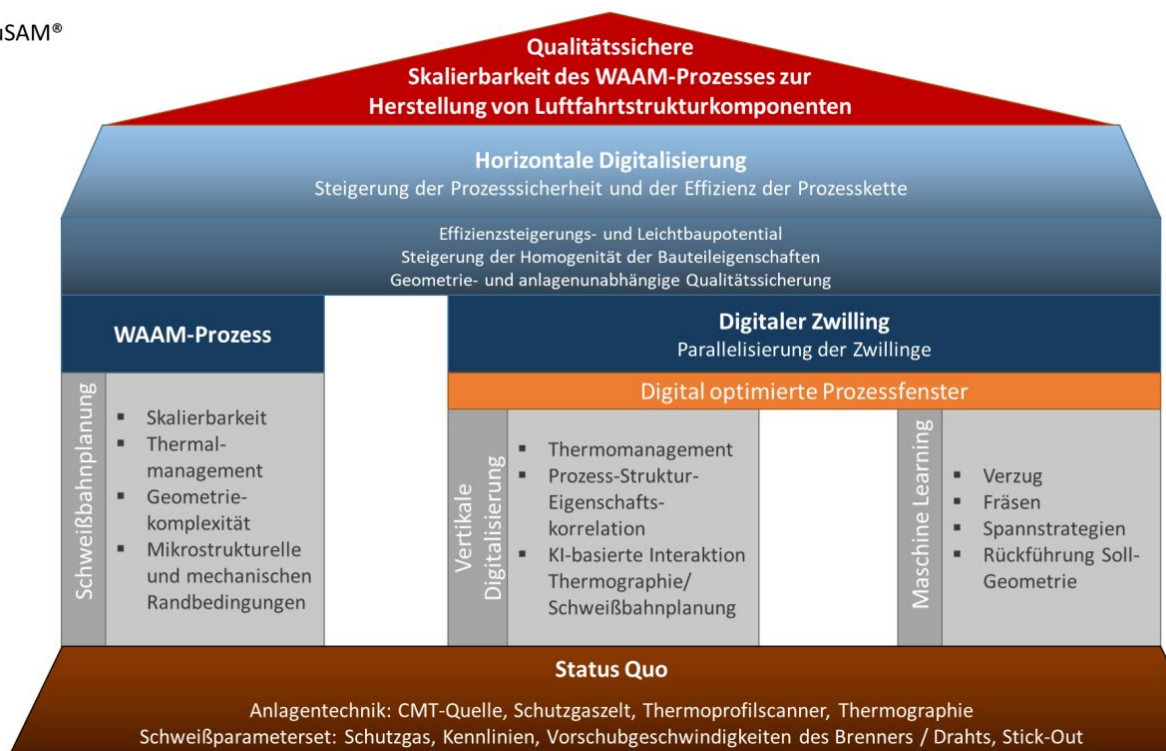
Die industrielle Verwertung der Projektergebnisse durch die Verbundpartner soll langfristig zur Stärkung der technologischen Wettbewerbsfähigkeit des Luftfahrtstandorts Deutschland sowie zur Sicherung und zum Aufbau qualifizierter Arbeitsplätze beitragen. Von daher startete das Verbundprojekt mit den folgenden vier technologischen Projektzielen:

1. Weiterentwicklung des WAAM-Prozesses zur qualitätsgesicherten additiven Fertigung von Titanstrukturen mit Bauteilabmessungen von mindestens 1 m in einer Raumrichtung, bei gleichzeitig erhöhter Aufbaurate und homogenen Materialeigenschaften.
2. Entwicklung einer intelligenten Bahnplanung sowie eines digitalen Zwillings für den WAAM-Prozess unter Einbindung maschineller Lernverfahren.
3. Auslegung angepasster Zerspanungsstrategien für additiv gefertigte Titan-Großbauteile, einschließlich digitaler Prozessmodelle und datenbasierter Optimierung der Fräsprozesse.

4. Entwicklung und Validierung einer Fertigungszelle für additive Titan-Großstrukturen mit horizontal und vertikal integrierter digitaler Prozesskette zur Prozesssteuerung, Qualitätsüberwachung und -optimierung über die gesamte Prozesskette.

Die nachfolgende Abbildung verdeutlicht die Projektstruktur und die abgeleiteten Zielsetzungen. Dies baut auf dem Stand der Technik bzw. dem Status Quo des Projektkonsortiums zu Beginn der Projektlaufzeit im Jahr 2022 auf.

QuSAM®





2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Teilprojekt der HEGGEMANN AG (im weiteren Verlauf HEGGEMANN oder kurz HEG) wurde am einzigen Unternehmensstandort am Flughafen Paderborn-Lippstadt in Büren durchgeführt. Seit der Gründung 1962 als Luftfahrttechnischer Betrieb hat sich HEGGEMANN als anerkannter Spezialist für die Entwicklung und Fertigung komplexer metallischer Leichtbaustrukturen in der Luft- und Raumfahrt sowie für automobiltechnische und industrielle Anwendungen etabliert. Unter dem Leitgedanken „360° – from Engineering to Production“ deckt das Unternehmen die vollständige Wertschöpfungskette von der Entwicklung bis zur Produktion einbaufertiger Systeme ab.

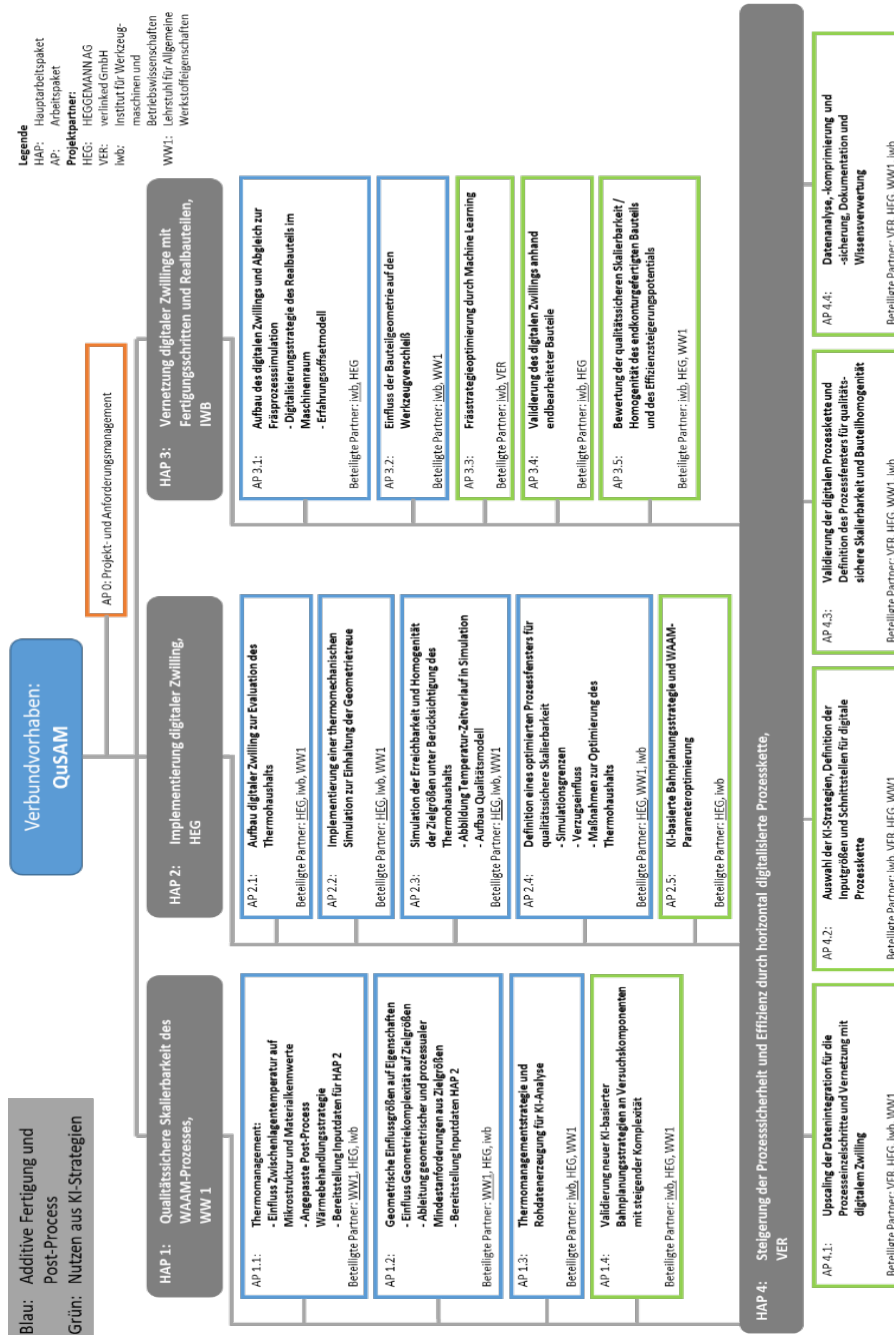
Zum Projektstart im April 2022 verfügte HEGGEMANN über ausreichende Personalkapazitäten im Engineering-Bereich sowie über entsprechende Fertigungsflächen. Die vorhandene schweißtechnische Infrastruktur und das Know-how zur Entwicklung und Absicherung von Schweißprozessen gemäß gültigen Qualitätsanforderungen bildeten eine solide Grundlage für die Projektbearbeitung. Zur Qualitätssicherung standen über die gesamte Projektlaufzeit eine 3D-Bauteilvermessung zum berührungslosen Scannen, weitere Mess- und Prüfeinrichtungen zur Toleranz- und Qualitätskontrolle sowie ein eigenes, dem Engineering zugeordnetes Werkstofflabor zur Verfügung.

HEGGEMANN brachte langjährige und umfassende Kompetenzen bzgl. der industriellen Verarbeitung und Bearbeitung von Titan- und Aluminiumlegierungen in den Projektverbund ein. Insbesondere bzgl. der zerspanenden Bearbeitung, des Schweißens, der Blechbearbeitung und der Montage komplexer Baugruppen verfügt HEGGEMANN über viel Erfahrung. Vor dem Hintergrund marktseitiger und umweltpolitischer Anforderungen bestand die dringliche Notwendigkeit, effizientere Fertigungsverfahren für hochpreisige und energieintensive Strukturwerkstoffe wie Titan- und Aluminiumlegierungen zu entwickeln und zur Industriereife zu bringen.

Die hohe Fertigungstiefe, das umfassende Know-how in der Verarbeitung anspruchsvoller metallischer Werkstoffe, der eigene Werkzeug- und Vorrichtungsbau sowie die Erfahrung in der Entwicklung und Umsetzung komplexer Fertigungsprozesse bis zur Serienfertigung wurden erfolgreich für die Zielerreichung des Innovationsvorhabens eingesetzt. Zusätzlich ermöglichte die Expertise in der internen Ausbildung von Personal im Schmelzschweißen und die regelmäßigen Audits durch das NADCAP Board ein sicheres Agieren in noch unregulierten Teilbereichen der additiven Fertigung und bereicherte die Projektbegleitung als Qualitätspartner.

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Der Erfolg des Verbundvorhabens war maßgeblich von der Zusammenarbeit zwischen den Partnern und einer klaren Verantwortlichkeitsverteilung abhängig. Die umfangreichen Arbeiten wurden in vier Hauptarbeitspakete (HAP) gegliedert, die aufgrund der Komplexität in insgesamt 18 inhaltliche Arbeitspakete (APs) unterteilt waren. Jeder geförderte Projektpartner leitete dabei verantwortlich ein HAP. Die Gesamtkoordination des Verbunds übernahm HEGGEMANN im Arbeitspaket 0 (Projektmanagement). Der folgende Projektstrukturplan stellt die HAPs und APs sowie die Zuordnung der Verantwortlichkeiten dar.



Die folgende Tabelle zeigt übersichtlich die zeitliche Planung der Meilensteine über die Projektlaufzeit sowie die jeweiligen Zielerreichungskriterien. Alle drei Meilensteine wurden im Projektverlauf gemäß dieser Übersicht erreicht und erfolgreich abgeschlossen. Meilenstein 3 wurde allerdings aufgrund inhaltlicher Verzögerungen von Monat 36 auf Monat 39 verschoben.

Meilenstein	Zeitpunkt im Projekt	Zielerreichungskriterien
MS 1	nach 12 Monaten	<ul style="list-style-type: none"> - Erste Probekörper unter Anwendung eines optimierten Thermomanagements wurden hergestellt und analysiert - Erste Rückschlüsse auf geometrische Randbedingungen sind bekannt - Datenübergabe für Thermosimulation wurde begonnen - Strategie zum Aufbau des digitalen Zwillings ist erfolgt, - Digitaler Zwilling ist im Aufbau - Auswahl KI-Modell für WAAM-Bahnplanung ist abgeschlossen
MS 2	nach 24 Monaten	<ul style="list-style-type: none"> - Digitaler Zwilling ist implementiert - Struktur der horizontal vernetzten Prozesskette ist aufgebaut - Thermohaushaltanalyse ist verfeinert und wird zur weiteren Optimierung des WAAM-Prozesses genutzt - Einflussgrößen auf Skalierbarkeit sind erarbeitet - KI-Verfahren sind aufgebaut und erste Trainingsdaten wurden bereitgestellt
MS 3	nach 39 Monaten	<ul style="list-style-type: none"> - Optimierte Prozesskette ist bekannt - Grenzen der qualitätssicheren Skalierbarkeit sind ermittelt - Prozess ist hinsichtlich QS und Effizienz optimiert - Digitale Zwilling erlaubt QS-Vorhersagen - QUSAM Prozess wurde im industriellen Umfeld erfolgreich demonstriert

Die Projektlaufzeit war zum Zeitpunkt der Bewilligung im April 2022 mit 36 Monaten geplant. Im Jahr 2024 traten dann die in der Verbundvorhabenbeschreibung beschriebenen Risiken bezogen auf den Nachweis der Homogenität des Werkstoffgefüges der erzeugten Strukturen entlang des „Kritischen Pfads“ ein (AP 1.1, AP 2.5 und AP 3.5). Durch die damit erforderlichen und umfangreichen Iterationsschleifen zur Erreichung eines stabilen WAAM-Prozesses bei skalierten Strukturen mit entsprechend nachweislich hoher Qualität konnten die gemäß Arbeitsplan für diese Projektphase eigentlich vorgesehenen Arbeiten bei HEGGEMANN und bei anderen Projektpartnern nicht wie geplant begonnen und durchgeführt werden (AP 3.4, AP 4.3 und AP 4.4). Die rückwirkende Bewilligung des Projektes führte außerdem dazu, dass die Unterstützung seitens der FAU aufgrund Mitarbeiterkapazität in AP 1.1 erst zeitlich verzögert begonnen werden konnte.

Diese Herausforderungen wurden noch durch nicht vorhersehbaren Mehraufwand bei der Optimierung der Thermostrategie des WAAM-Prozesses überlagert. Insbesondere durch die im Vergleich zum ursprünglichen Arbeitsplan deutlich aufwendigeren Untersuchungen zum Einfluss einer geregelten Abkühlung auf die erreichbaren thermomechanischen Werkstoffeigenschaften entstand weiterer Verzug im Arbeitsplan. Die Optimierung dieser Prozessparameter war jedoch für die Skalierung des Prozesses und damit für die Verwertungsperspektive der Projektergebnisse im Hinblick auf gute und homogene Materialeigenschaften unabdingbar.

Als Gegensteuerungsmaßnahmen wurden bei HEGGEMANN die Personalkapazitäten erhöht, um entsprechende Lösungsansätze schneller zur erarbeiten. Die im Netzplan dargestellten vielfältigen Abhängigkeiten zwischen den Arbeitspaketen verhinderten dabei aber das Vorziehen und Verlagern von Arbeitspaketen zur Reduzierung des zeitlichen Verzugs. Im Teilprojekt von HEGGEMANN wurden daher die geplanten Arbeitsumfänge um mehrere Monate verzögert. Trotz Erhöhung der Personalressourcen wäre der zeitliche Rückstand bis zum regulären Ende des Forschungsvorhabens zum 31.3.2025 nicht wieder aufgeholt worden.

Daher beantragten alle Projektpartner einvernehmlich im November 2024 eine kostenneutrale Laufzeitverlängerung um sechs Monate, welche vom Projektträger mit dem Änderungsbescheid Nr. 3 vom 19.12.2024 bewilligt wurde. Mit dieser Laufzeitverlängerung wurde das Vorhaben von allen Partnern erfolgreich zum 30.09.2025 abgeschlossen.

Über die gesamte Projektlaufzeit von 42 Monaten führten die Partner im 14-tägigen Rhythmus digitale Abstimmungsmeetings unter der Koordination von HEGGEMANN durch. Bei HEGGEMANN fanden zudem ebenfalls im 14-tägigen Rhythmus interne Arbeits- und Projektmeetings mit den im Projekt beteiligten Mitarbeitern sowie der kaufmännischen Leitung statt.

Alle Verbundpartner kamen zudem an den folgenden Terminen zu Präsenz- oder Onlineprojektmeetings zusammen.

01.06.2022	Kickoff mit Projektträger (HEGGEMANN) mit Projektträger
23.11.2022	1. Halbjahresmeeting (Online)
04.05.2023	2. Halbjahresmeeting (HEGGEMANN)
22.11.2023	3. Halbjahresmeeting (HEGGEMANN) mit Projektträger
05.06.2024	4. Halbjahresmeeting (TUM)
27.11.2024	5. Halbjahresmeeting (FAU)
27.05.2024	6. Halbjahresmeeting (Verlinked)
01.10.2025	Abschlussmeeting (HEGGEMANN)

Für den Datenaustausch stellte die TU München einen SharePoint zur Verfügung, dadurch konnten die Datenablage und der Datenaustausch im Projekt zentralisiert und effizient gestaltet werden.

Die inhaltlichen Ergebnisse des Teilprojekts von HEGGEMANN, welche in enger Kooperation mit den Projektpartnern entstanden, sind im Kapitel „Eingehende Darstellung der Projektergebnisse“ detailliert beschrieben und dargestellt.

4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Wire & Arc Additive Manufacturing (kurz: WAAM)

Aufbauend auf dem LuFo V Projekt „REGULUS“ lag dem WAAM-Prozess ein bereits etablierter Stand der Technik zugrunde, bei dem eine CMT-Stromquelle eingesetzt wurde, die eine gezielte Tropfenablösung im Schmelzbad und damit einen stabilen, skalierbaren Aufbau großvolumiger Titanstrukturen erlaubte. Auf dieser Basis galt der Einsatz drahtbasierter Zusatzwerkstoffe als vorteilhaft, da gegenüber pulverbasierten SLM-Verfahren eine geringere Porositätsneigung und damit günstigere Ermüdungs- und Rissausbreitungseigenschaften erzielt wurden, was insbesondere für Luftfahrtanwendungen von zentraler Bedeutung ist.

Als weiterer Stand der Technik standen flexible WAAM-Anlagenkonzepte zur Verfügung, die sowohl robotergestützte Systeme als auch CNC-Maschinen verschiedener Achszahlen umfassten und auf langjährig erprobter MSG-Anlagentechnik mit hohem Automatisierungs- und sensorischem Überwachungsniveau basierten. Für Ti-6Al-4V wurde in REGULUS zudem eine Schutzgasführung entwickelt, die Restsauerstoffgehalte im Bereich von etwa 50 ppm ermöglichte und damit bestehende OEM-Spezifikationen erfüllte, wodurch WAAM als potenzieller Ersatz für konventionelle Schweißprozesse in der Luftfahrt bewertet werden konnte.

Parallel dazu lag ein normativer Rahmen vor, der sich aus grundlegenden AM-Normen (z.B. VDI- und ISO/ASTM-Reihen), luftfahrtspezifischen AMS-Vorgaben sowie einschlägigen NADCAP-Checklisten für Schweiß- und AM-Prozesse zusammensetzte und bereits in den LuFo Projekten REGULUS und AMAvia für erste Qualitätsvorausplanungen herangezogen wurde. Dennoch zeigte sich, dass die damaligen AM-Anlagen nur begrenzt Aussagen zur resultierenden Bauteilqualität erlaubten, wodurch der Bedarf nach erweiterten Konzepten zur Erfassung der Zeit- und orts aufgelösten Temperaturhistorie, zur weitergehenden Digitalisierung der Prozesskette und zum Einsatz digitaler Zwillinge als Ausgangspunkt und als Herausforderung für QuSAM deutlich wurde. Eine wichtige Quelle bildete bei Projektbeginn auch die bereits vorhandene Boeing Norm BMS 7-361 Rev.C, welche Anforderungen für Titanhalbzeuge aus WAAM umfasst und wichtige Diskussionsgrundlage im Projekt darstellte.

Digitalisierung des Prozesses

Zum Zeitpunkt des Projektbeginns stellte der Einsatz von KI-Technologien zur Unterstützung von Entscheidungsprozessen sowie zur Automatisierung wiederkehrender Tätigkeiten in der Fertigungstechnik ein dynamisches Forschungsfeld dar. Die zugrundeliegenden Verfahren basieren auf Methoden der Statistik, Stochastik, Wahrscheinlichkeitsrechnung und Numerik und ermöglichen es, komplexe Wechselwirkungen zwischen einer Vielzahl von Prozessparametern mittels datengetriebener Ursache-Wirkungs-Modelle abzubilden. Auf diese Weise können relevante Systemzusammenhänge identifiziert werden, ohne die zugrunde liegende Prozessphysik vollständig analytisch beschreiben zu müssen.

Für die industrielle Anwendung im Kontext von WAAM-Prozessen bestand zum Projektbeginn jedoch ein deutlicher Entwicklungsbedarf hinsichtlich geeigneter Daten- und Analyseinfrastrukturen. Insbesondere fehlten skalierbare Architekturen zur strukturierten Erfassung, Speicherung und Auswertung der im Prozess entstehenden Daten. Eine besondere Herausforderung stellten dabei die prozessbegleitend anfallenden zeitbasierten Signale dar. Diese wiesen häufig ein rechteckförmiges Signalprofil mit zahlreichen Inhomogenitäten auf, welches sich mit

klassischen statistischen Kenngrößen wie Mittelwert und Standardabweichung nur unzureichend beschreiben ließ. Für eine belastbare Analyse waren daher spezifische Auswertemethoden erforderlich.

Auch das Konzept des digitalen Zwillings zur Verknüpfung von Simulationsmodellen mit realen Prozessdaten befand sich im Bereich der additiven Fertigung zum Projektbeginn noch in einem frühen Entwicklungsstadium. Zwar lagen erste Ansätze zur Simulation von Mehrlagenschweißprozessen vor, jedoch waren sowohl die Handhabung von Simulationen großer Bauteile als auch die Aussagefähigkeit der verfügbaren Materialmodelle deutlich eingeschränkt. Eine durchgängige Kopplung mehrerer Simulationsketten – beispielsweise die Verbindung einer thermo-mechanisch gekoppelten WAAM-Prozesssimulation mit einer nachgelagerten Fräsprozesssimulation – war lediglich in grundlegenden Ansätzen untersucht und stellte noch keinen etablierten Stand der Technik dar.

Eine solche gekoppelte thermo-mechanische Simulation besitzt jedoch ein erhebliches Potenzial für die modellgestützte Prozessauslegung. Insbesondere eröffnet sie die Möglichkeit, angelernte Systemzusammenhänge zur Generierung geeigneter Simulationseingaben zu nutzen und experimentelle Validierungsdaten gezielt einzubinden. Dadurch kann der Umfang aufwändiger experimenteller Validierungsversuche perspektivisch reduziert werden. Die im Rahmen des Vorhabens entwickelten Ansätze sollen darüber hinaus langfristig für die Geometrievorbereitung, die Diskretisierung sowie die Validierung der wandernden Wärmequelle in entsprechenden Simulationsmodellen nutzbar gemacht werden.

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

Schutzrechte konnten bei Antragsstellung und im Projektverlauf seitens HEGGEMANN nicht entdeckt werden. Die Referenzen zu den verwendeten Literaturquellen des Standes der Technik und Normen sind nachfolgend aufgelistet und aus dem Text verlinkt.

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

Bereits während der Projektbeantragung sowie begleitend zur Projektlaufzeit, insbesondere zu den definierten Meilensteinen, wurde der Stand der Technik hinsichtlich aktueller Veröffentlichungen zu lichtbogenbasierten additiven Fertigungsverfahren (WAAM und Hybridprozesse) für Aluminium- und Titanlegierungen kontinuierlich analysiert. Neben internetbasierten Suchprogrammen wurden hierfür einschlägige Förderdatenbanken, die Technische Informationsbibliothek Hannover sowie moderne KI-gestützte Recherchewerkzeuge wie Consensus genutzt. Im Projektverlauf zeigte sich ein wachsendes Marktinteresse am WAAM-Verfahren, was sich in einer steigenden Anzahl an Fachpublikationen widerspiegelte. Bestimmte Themenbereiche wie Simulation und der Einsatz künstlicher Intelligenz erfuhren zwischen 2022 und 2023 einen deutlichen Aufschwung [Che], wobei sich 2025 ein rückläufiger Trend abzeichnete, bedingt durch die verstärkte Fokussierung des Marktes auf allgemeine KI-Anwendungen und Nachhaltigkeitsthemen. Eine gute Zusammenfassung für WAAM bietet eine aktuelle Review Studie [Che].

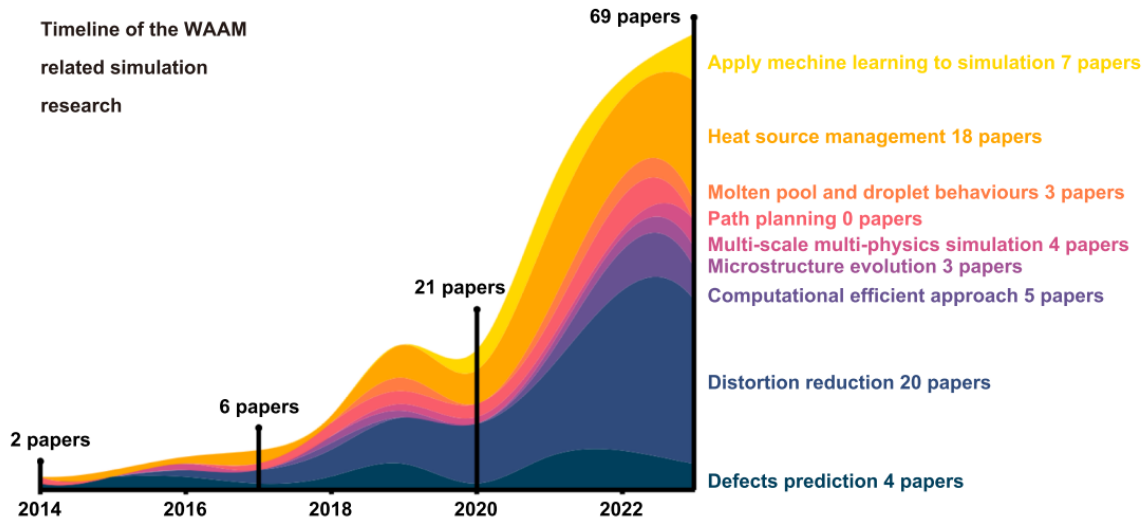


Figure 2. Timeline of the WAAM-related simulation research.

Kürzel	Titel
[Che]	Z. Chen et al.: A comprehensive review and future perspectives of simulation approaches in wire arc additive manufacturing (WAAM), Int. J. Extrem. Manuf. 7 022016, 2025
[Tae]	T. Ko et al.: Review of Recent Additive Manufacturing and Welding Research with Application of Physics-Informed Neural Networks, Journal of Welding and Joining, Vol.42 No.4 pp357-365, https://doi.org/10.5781/JWJ.2024.42.4.3 , 2024

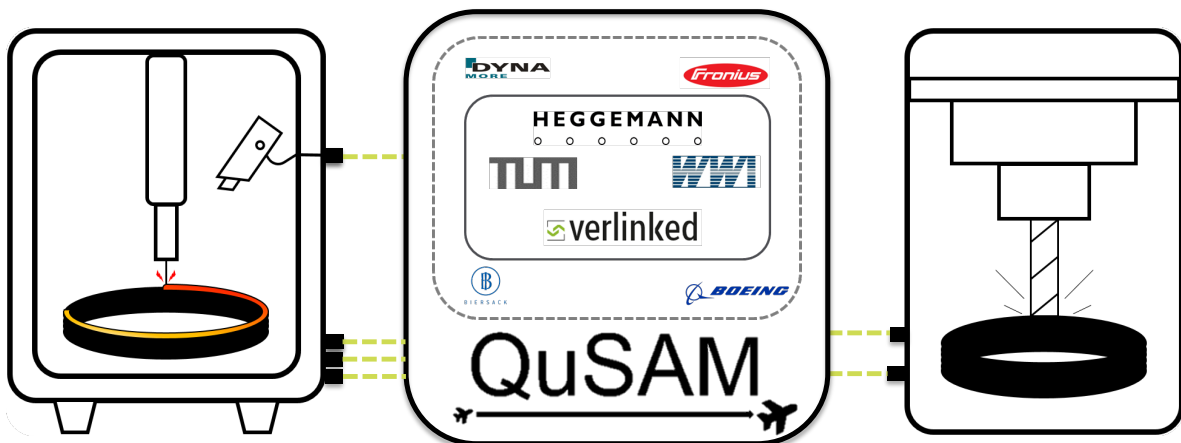
5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Zusammenarbeit innerhalb des QuSAM-Projektkonsortiums gestaltete sich über die gesamte Projektlaufzeit hinweg sehr konstruktiv und zielorientiert. Die regelmäßigen, im vierzehntägigen Rhythmus durchgeführten Konsortialmeetings sowie ergänzende bilaterale Abstimmungsgespräche ermöglichten einen kontinuierlichen fachlichen Austausch und eine enge Koordination der Arbeiten. Dadurch konnten die Arbeitspakete effizient bearbeitet und die im Arbeitsplan definierten Meilensteine planmäßig erreicht werden. Die strukturierte Abstimmung im Konsortium trug wesentlich dazu bei, dass sämtliche Projektarbeiten im Einklang mit der Zielstellung und der angestrebten Verwertungsperspektive des Projekts umgesetzt werden konnten.

Besonders hervorzuheben ist die kontinuierliche und engagierte Unterstützung der assoziierten Partner Boeing und DYNAMore. Beide Partner brachten über die gesamte Projektlaufzeit hinweg umfangreiche fachliche Expertise sowie wertvolle industrielle Perspektiven in das Vorhaben ein. Dies umfasste insbesondere die Teilnahme an projektbezogenen Abstimmungen, die Einbringung praxisrelevanter Anforderungen sowie die konstruktive Diskussion von Zwischenergebnissen. Dadurch konnten die im Projekt entwickelten Ansätze frühzeitig an industrielle Anforderungen angepasst und ihre Anwendungsrelevanz weiter geschärft werden. Das Engagement weiterer assoziierter Partner entwickelte sich im Verlauf der Projektlaufzeit teilweise unterschiedlich. Während zu Projektbeginn ein breites Interesse an den Projektaktivitäten bestand, reduzierte sich die aktive Beteiligung einzelner Partner im weiteren Verlauf, insbesondere infolge interner personeller Umstrukturierungen bei Biersack und Fronius International. Ungeachtet dessen unterstützte Fronius Deutschland das Vorhaben bis zum Projektende weiterhin durch fachlichen Austausch sowie zuverlässigen technischen Support im Kontext der eingesetzten Schweißtechnologien.

Zusammenfassend hat die Zusammenarbeit im Projektverbund sowie mit den assoziierten Partnern wesentlich zur erfolgreichen Durchführung des Vorhabens beigetragen. Insbesondere die kontinuierliche Unterstützung durch Boeing stellte sicher, dass die im Projekt entwickelten Ansätze konsequent an industriellen Anforderungen ausgerichtet werden konnten und die Projektarbeiten im Einklang mit Arbeitsplan, Zielstellung und Verwertungsperspektive umgesetzt wurden.

Die nachfolgende Abbildung zeigt die Zusammensetzung des Projektverbunds mit den geförderten Projektpartnern im inneren Kreis sowie den assoziierten Partnern im äußeren Kreis.



Eingehende Darstellung der Projektergebnisse

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

Ziel des Projekts „QuSAM – Qualitätssichere Skalierbarkeit des WAAM-Prozesses zur Herstellung von Luftfahrtstrukturkomponenten“ war die Entwicklung und Validierung einer qualitätssicher skalierbaren Fertigungsprozesskette auf Basis des Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM). Im Fokus stand die Kombination additiver Fertigungsverfahren mit nachgelagerter spanender Bearbeitung, um eine nach luftfahrttechnischen Qualitätsanforderungen qualifizierbare und zugleich ressourceneffiziente Herstellung großformatiger Strukturbauteile aus Titan- und Aluminiumlegierungen zu ermöglichen.

Mit dem Zuwendungsbescheid erfolgte der Projektstart zum 01.04.2022. Die inhaltlichen Arbeiten wurden entsprechend planmäßig aufgenommen und im Rahmen der vorgesehenen Projektstruktur umgesetzt. Nach einer kostenneutralen Laufzeitverlängerung konnte das Gesamtprojekt einschließlich aller Teilvorhaben erfolgreich abgeschlossen werden. Die im Projekt definierten Hauptziele sowie die daraus abgeleiteten Zielerreichungskriterien der einzelnen Meilensteine wurden im Projektverlauf erreicht. Die quantitative Bewertung der Zielerreichung erfolgte auf Basis eines skalierten Referenzbauteils, das im Rahmen des Projekts entwickelt und gefertigt wurde. Die Bewertung und Einordnung der erzielten Ergebnisse wurde in enger Abstimmung mit den industriellen und wissenschaftlichen Projektpartnern des Verbundvorhabens vorgenommen.

Für die Bearbeitung des Projekts bis zum 30.09.2025 wurden im Rahmen der kostenneutralen Laufzeitverlängerung zusätzliche Mittel für Personalkosten benötigt. Diese konnten durch die bewilligte Umwidmung von Mitteln aus dem Materialbudget ermöglicht werden. Aufgrund zuvor genannter Verzögerungen und ungeplanter Herausforderungen wurde im Projektverlauf deutlich weniger Material verbraucht als ursprünglich eingeplant. Gleichzeitig erforderte die verlängerte Bearbeitungszeit zusätzliche Personalkapazitäten. Die Umwidmung von Materialmitteln zu Personalmitteln war daher notwendig, um die im Projekt formulierten Ziele vollständig und planmäßig erreichen zu können.

Im Folgenden werden die von HEGGEMANN im Rahmen des Vorhabens erzielten Ergebnisse strukturiert nach Hauptarbeitspaketen und zugehörigen Arbeitspaketen dargestellt und erläutert.

HAP 0 – Projekt- und Anforderungsmanagement

Im Rahmen dieses Arbeitspakets koordinierte HEGGEMANN das Verbundprojekt und stellte sicher, dass sowohl die Ziele des eigenen Teilprojekts als auch des Gesamtvorhabens gemäß Arbeitsplan, Zeit- und Budgetrahmen erreicht wurden. Alle Arbeitsergebnisse wurden kontinuierlich dokumentiert und fristgerecht gegenüber dem Projektträger nachgewiesen.

Während der gesamten Projektlaufzeit fanden regelmäßige Abstimmungen mit einzelnen oder mehreren Partnern statt, ergänzt durch Besuche vor Ort. Zu definierten Meilensteinen bewertete HEGGEMANN gemeinsam mit den Partnern den Projektfortschritt, definierte Prioritäten für nachfolgende Phasen und überwachte die Einhaltung der Terminalschiene. Dabei wurde die Verwertungsperspektive konsequent in allen Meilenstein-Reviews berücksichtigt, um die Ergebnisse gezielt für industrielle Anwendungen nutzbar zu machen.

Als Luftfahrt zugelassener Herstellbetrieb und verantwortlicher Partner für die Prozessqualität profitierte HEGGEMANN von einer sehr guten, konstruktiven und verbindlichen Zusammenarbeit mit allen Projektpartnern. Auf dieser Basis konnte eine zielorientierte einheitliche Arbeitsweise etabliert und die Umsetzung der Arbeitspakete effizient koordiniert werden.

Die TU München stellte über SharePoint (LRZ Sync & Share) eine zentrale Plattform für den Austausch aller relevanten Daten, Dokumente und übergeordneter Termine bereit. HEGGEMANN nutzte diese Infrastruktur, um während der gesamten 42-monatigen Projektlaufzeit alle für die Partner relevanten Unterlagen und Daten zentral zu verwalten. Alle Berichte und Nachweise über die Arbeiten im eigenen Teilprojekt sowie für das Verbundprojekt wurden von HEGGEMANN fristgerecht über das „Easy Online Portal“ eingereicht.

HAP 1 – Qualitätssichere Skalierbarkeit des WAAM-Prozesses

Das Hauptarbeitspaket 1 stellte die inhaltliche und methodische Anbindung an das Vorgängerprojekt REGULUS sicher. Im Mittelpunkt stand die Übernahme, Bewertung und gezielte Anpassung der im Projekt REGULUS entwickelten und erprobten Prozessparameter an die im Vorhaben QuSAM eingesetzte WAAM-Anlagenkonfiguration für den Werkstoff Ti-6Al-4V.

Zu Beginn des Projekts erfolgten Abstimmungen mit den Projektpartnern zur Festlegung der notwendigen Untersuchungen, die vor einer Skalierung auf größere Bauteilstrukturen durchzuführen waren. Während im Vorgängerprojekt REGULUS primär die grundsätzliche Machbarkeit und technische Umsetzbarkeit des WAAM-Prozesses im Fokus standen, wurden dort bereits standardisierte Versuchsreihen sowie eine systematische methodische Vorgehensweise etabliert. Aufbauend auf diesen Vorarbeiten konnte gezeigt werden, dass die Verfahrensvariante WAAM in Kombination mit dem CMT-Prozess für den Werkstoff Ti-6Al-4V ein hohes Potenzial aufweist. Im Rahmen des Projekts QuSAM wurden daher bestehende Lücken in der experimentellen und prozessbezogenen Datenbasis gezielt adressiert. Darauf aufbauend wurden unter Einsatz moderner Methoden der Prozessdigitalisierung weiterführende Untersuchungen zur physikalischen Beherrschung des komplexen WAAM-Prozesses durchgeführt. Ziel war es, eine möglichst hohe und reproduzierbare Werkstoff- und Bauteilqualität zu gewährleisten.

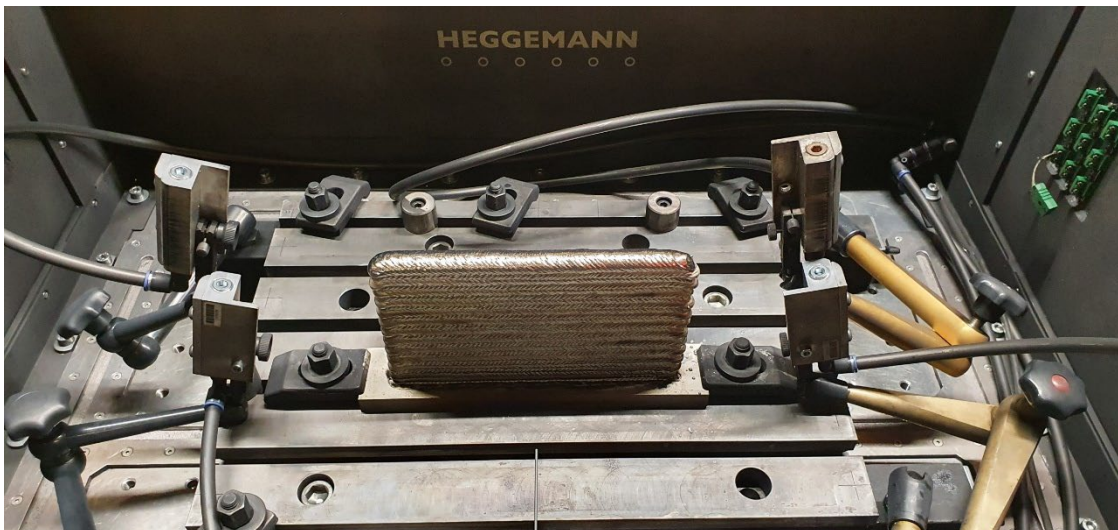
Im Folgenden werden die von HEGGEMANN erarbeiteten Ergebnisse und Inhalte für die jeweiligen Arbeitspakete dargestellt. Weiterführende werkstofftechnische Analysen und Ergebnisse sind dem Bericht des Projektpartners FAU-WW1 zu entnehmen.

AP 1.1 – Thermomanagement

Der Schwerpunkt des Arbeitspaketes AP1.1 lag auf der Erfassung und Analyse der wesentlichen Einflüsse der Temperaturführung im Prozess und in der Wärmenachbehandlung. Die Eigenschaften von Ti-6Al-4V als α - β -Legierung hängen neben Korngröße und Orientierung von der Verteilung beider Phasen ab, was die Komplexität der Eigenschaftsanpassung im Vergleich zu einphasigen Legierungen erhöht.

Der Einfluss der Zwischenlagentemperatur wurde bereits in REGULUS dargestellt. In QuSAM kam die gezielte Abkühlung von Strukturen hinzu, um Zwischenlagentemperaturen schneller zu erreichen und Wartezeiten zu reduzieren. Für skalierte Bauteile war es besonders wichtig, dass Zwischenlagentemperaturen nicht unterschritten wurden. Alle Maßnahmen zur Abkühlung und Verzögerung der Wärmeleitung wurden als Use-Cases in HAP 2 beim digitalen Zwilling behandelt.

Als Zwischenlagentemperaturbereich wurde auf Basis entsprechender Vorversuche und der werkstofftechnischen Expertise im Projektverbund 250 °C gewählt und das Robotersteuerungsprogramm wurde für einen automatisierten Ablauf modifiziert. Durch eine Anpassung der Post-Prozess-Software konnte die Zwischenlagentemperatur per Laserpyrometer erfasst und die geometrische Höhe in Layermitte und Grundplatte als Referenz ermittelt werden, wodurch ein vollautomatisierter Prozess mit automatischen Offsets in z-Richtung und Temperaturregelung möglich wurde.



Mit der FAU wurden mehrere umfangreiche Serien an einfachen Wandgeometrien und im weiteren Projektverlauf im Schwierigkeitsgrad ansteigende Komplexitäten hinzu. Die Kühlung von Bauteilen hat HEGGEMANN sowohl als Wartezeit und mit Zwangskühlung untersucht. Durch die in HAP 2 noch weiter erläuterte Simulation konnten verschiedene Strategien für die Kühlung herausgearbeitet werden.

Proben mit seitlich laminar angeströmter Argon Gaskühlung wurden mit Proben ohne Kühlung verglichen (jeweils 24 Layer). Die Wartezeit konnte durch die Kühlung halbiert werden, was die Gesamtprozesszeit von 113 auf 77 Minuten reduzierte. Die berechnete Brutto-Druckrate betrug ca. 3 kg/h, die Netto-Druckrate (inkl. Wartezeit) lag bei 1,3 kg/h (ungekühlt) bzw. 1,8 kg/h (gekühlt). Diese Ergebnisse zeigten, dass das Potenzial des Verfahrens insbesondere bei größeren, skalierten Bauteilen liegt. Da die Gesamtzeit durch den Maschinenstundensatz direkt mit den Bauteilkosten verbunden ist, kommt eine kürzere Gesamtzeit einer Kosteneinsparung direkt zu gute.

In Bezug auf die technischen Ziele des Projektes ergaben sich hier noch ohne Benefit in der Zerspanung eine Einsparung von ca. 30%, wie die folgende Tabelle zeigt.

Probe	Kühlung	Masse [g]	Lichtbogenzeit [min]	Wartezeit [min]	Gesamtzeit [min]
1	nein	2468	49	64	113
2	ja	2315	48	29	77

In nachgelagerten Versuchen mit dickeren Wänden und der Abkühlzeiten ergaben sich sogar bis zu 300% Zeitersparnis im Vergleich zu nicht gekühlten Wänden (300l/min Argonkühlung hinter dem Brenner mit Schlitzdüse), da durch eine permanente Zwischenkühlung die Gesamtaufheizung insgesamt geringer bleibt und dadurch das Erreichen der Zwischenlagentemperatur deutlich schneller erfolgt. Bei dünneren Wänden ca. 12mm), wie im Beispiel mit den 30% Einsparung ist die Wärmespeicherung insgesamt geringer (kein Kerneffekt). Eine absolute Ersparnis kann nicht genannt werden, da sie mit dem Volumen ohne Kühlung exponentiell ist. Bedeutet im gleichen Zusammenhang, dass ohne Kühlung eine Wirtschaftlichkeit genau herausgearbeitet werden muss, bzw. auf höhere Zwischenlagentemperaturen ausgewichen werden muss.

HEGGEMANN hat sich mit der TUM und der FAU bezüglich der Probenversuche mit unterschiedlichen Kühlraten abgestimmt. Die Untersuchung der Wanddickeneinflüsse wurden in AP 1.2 durchgeführt. Auf Basis dieser Analysen wurden mit den Projektpartnern die folgenden Optimierungsansätze erarbeitet:

Für kleine Bauteile:

- Mehrere Bauteile auf einer oder mehreren Substratplatten zur Unterbrechung der Wärmeleitung
- Anpassung der Prozessleistung durch dünnere Schweißdrähte
- Wechsel von Linien zu punktförmiger Auftragslage (Cycle Step)
- Wechselseitiges Schweißen je nach Wärmeleitung

Für größere Bauteile:

- Schweißstrategie zur Einhaltung der Zwischenlagentemperatur (Just-in-Time-Prinzip)
- Verschlechterung der Wärmeleitung durch Verringerung von Wärmeleitflächen oder Vorrichtungsentkopplung
- Nutzung von Konvektion und Strahlung durch wärmereflektierende Umhausungen
- Einsatz mehrerer Roboter zur gegenseitigen Vorwärmung
- Einlagige Hilfsnähte auf der Substratplatte zur Temperatursteuerung

Das wichtigste Ergebnis dieser Untersuchungen für HEGGEMANN war die skalierbare Thermostategie, welche gezeigt hat, dass der Abkühlungsgradient nicht nur die Lichtbogenbrennzeit merklich erhöhen kann, sondern auch die mechanisch-technologischen Eigenschaften bei Wärmebehandlungen beeinflusst. Details hierzu sind dem Bericht der FAU zu entnehmen.

Die zunächst provisorische Kühlung mittels Anströmdüsen wurde im weiteren Verlauf der umfassenden Versuchsreihen iterativ optimiert, um die entsprechend gewünschten hohen Abkühlgradienten zu erreichen, bei denen der Prozess stabil bleibt. Dies gelang mit Schlieren-

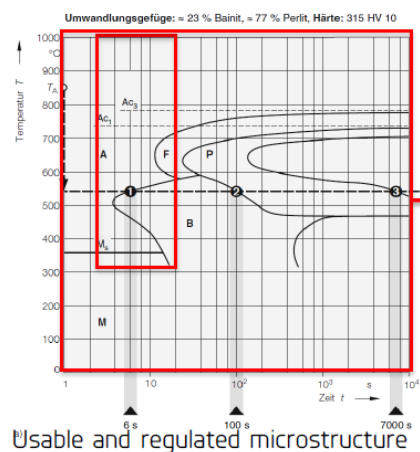
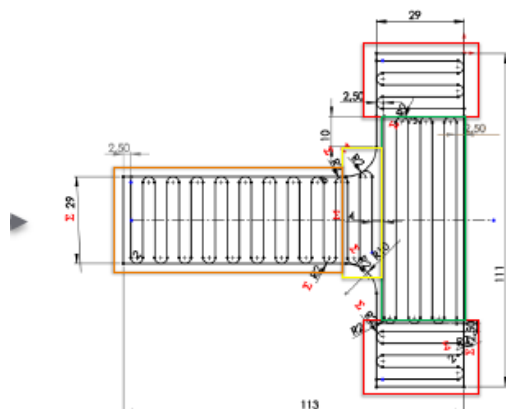
versuchen, um die ganzheitliche Schutzgasabdeckung rund um den Lichtbogen zu gewährleisten. Zur Parameterfindung wurden hauptsächlich die fehlerfreie Schweißbarkeit, also die rissfreie sichere Herstellung entlang der Kennlinie für Ti-6Al-4V, als Kriterium zugrunde gelegt. Im Anschluss erfolgte die Herstellung der Schweißnähte mit unterschiedlichsten Parametern in umfangreichen Versuchsreihen mit unterschiedlichen Nahtbreiten, Nahthöhen und Einbrandtiefen. Beispielhaft ist eine Parameterstudie mit 24 Proben in der folgenden Abbildung dargestellt.



Die umfangreich aufgezeichneten Prozessdaten in Kombination mit den Ergebnissen der Probenkörper hinsichtlich der werkstofftechnischen Qualität bildeten eine sehr gute Datenbasis zur Auswertung der Versuche und zum Ableiten entsprechender Prozessstrategien für größere Geometrien.

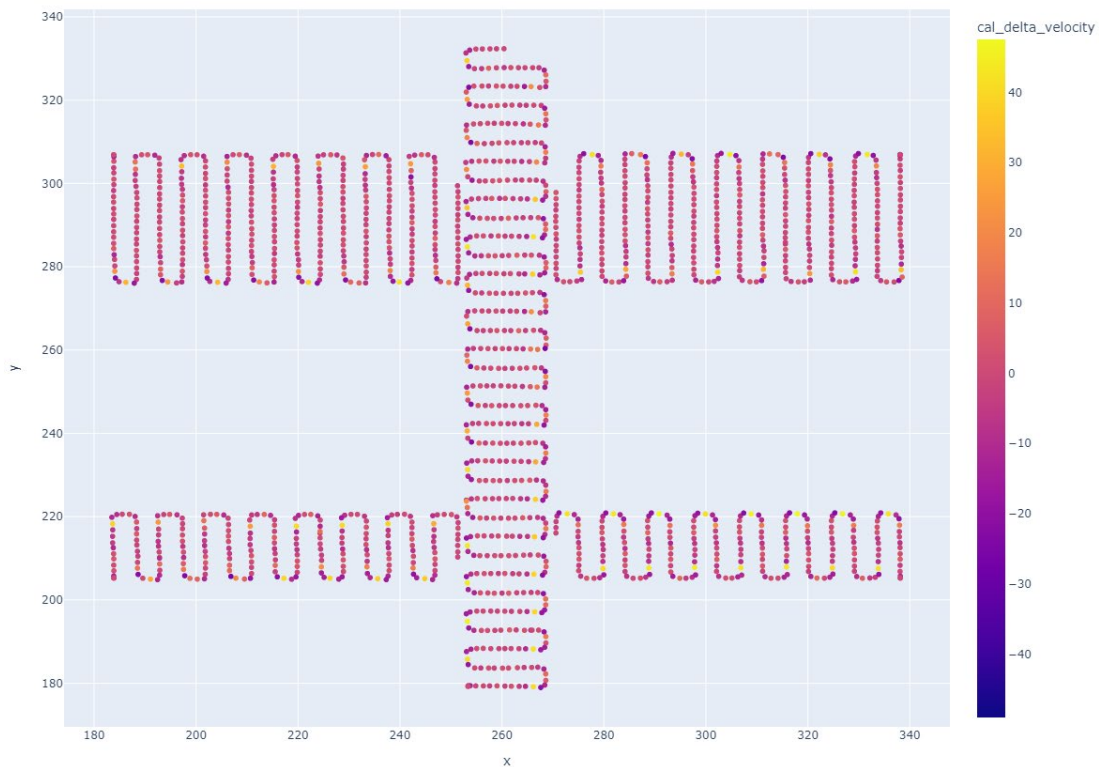
AP 1.2 – Geometrische Einflussgrößen auf Eigenschaften

Im Arbeitspaket AP1.2 wurden die im Vorgängerprojekt REGULUS sowie in AP1.1 gewonnenen Erkenntnisse zu geometrischen Einflussgrößen auf die entstehende Werkstoffstruktur systematisch auf größere und geometrisch komplexere Bauteile übertragen und weiter untersucht. Ziel war es, diese Erkenntnisse in geeignete Aufbaustrategien für den WAAM-Prozess zu überführen. Nachfolgend sind unterschiedliche Bahnführungsstrategien dargestellt. Alle Strategien wurden zunächst theoretisch dargestellt und bei HEGGEMANN simuliert und anschließend in Hardware umgesetzt und erprobt.



Besondere Aufmerksamkeit galt dabei Bereichen mit Bahnkreuzungen, da sich in solchen Zonen häufig veränderte thermische Randbedingungen und daraus resultierende Abweichungen in den mechanisch-technologischen Eigenschaften ergeben können. Mit zunehmender geometrischer Komplexität steigt die Anzahl unterschiedlicher Kreuzungssituationen deutlich an, sodass robuste und anpassungsfähige Bahnstrategien eine zentrale Voraussetzung für eine reproduzierbare Bauteilqualität darstellen. Von besonderer Bedeutung ist dabei die Vermeidung innerer Unregelmäßigkeiten beziehungsweise Fehlstellen, beispielsweise Lunker. Diese makroskopischen Defekte wirken sich deutlich stärker auf die Bauteilintegrität aus als lokale Gefügeveränderungen und können im Nachgang nur begrenzt durch Anpassungen der Aufbaustrategie kompensiert werden.

Zur Untersuchung geeigneter Strategien wurden unterschiedliche Bahnführungsansätze entwickelt. Diese wurden zunächst konzeptionell beschrieben und mittels Simulation bewertet, bevor eine experimentelle Umsetzung auf der WAAM-Anlage erfolgte. Im Verlauf dieser Untersuchungen zeigte sich, dass sowohl die eingesetzten Stromquellen als auch die Robotersteuerung über interne Regelmechanismen verfügen, die das Prozessverhalten beeinflussen. Insbesondere kam es bei Eckbewegungen zu automatischen Verzögerungs- und Beschleunigungsvorgängen des Roboters, die durch den Anwender nur eingeschränkt beeinflussbar waren. Diese Effekte wurden daher systematisch analysiert und bei der Auslegung der Schweißparameter entsprechend berücksichtigt.



Ein weiterer Einflussfaktor ergibt sich aus der Konvektion an der Außenwand des Bauteils sowie dem daraus resultierenden dendritischen Erstarrungsverhalten in randnahen Bereichen. Die beschriebenen dynamischen Effekte der Roboterbewegung wurden dadurch teilweise relativiert und erwiesen sich insgesamt als weniger kritisch, insbesondere da randnahe Bereiche

im Anschluss durch spanende Nachbearbeitung im Aufmaß entfernt wurden. Die im Projekt umgesetzte Digitalisierung des WAAM-Prozesses ermöglichte hierbei vertiefte Einblicke in das Prozessverhalten, die allein auf Basis der Einstellparameter von Stromquelle und Robotersteuerung nur eingeschränkt nachvollziehbar gewesen wären.

Im weiteren Projektverlauf untersuchte HEGGEMANN insbesondere den Einfluss von Wanddickenverläufen sowie Maßnahmen zur gezielten Kühlung während des Aufbaus. Parallel dazu beschäftigte sich die Technische Universität München mit der Analyse von Kreuzungsstößen und Kreisgeometrien innerhalb der Aufbaustrukturen. Die im Projekt durchgeführten werkstofftechnischen Untersuchungen der FAU zeigten zudem, dass spezielle Kühlkonzepte einen positiven Einfluss auf die Homogenisierung der Wartezeiten zwischen den Lagen haben können. Darüber hinaus ergeben sich zusätzliche Vorteile durch gezielte Kühlstrategien sowie nachgeschaltete Wärmebehandlungsprozesse, beispielsweise Spannungsarmglühen.

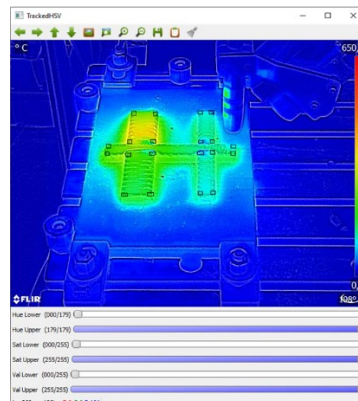
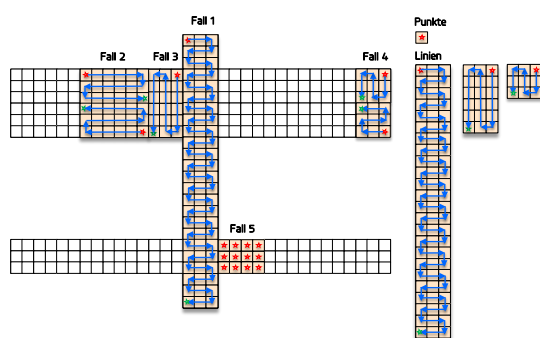
Ergänzend wurden mithilfe des im Hauptarbeitspaket 2 weiterentwickelten digitalen Zwillings Analysen zur Plausibilitätsprüfung der experimentellen Ergebnisse durchgeführt. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse, insbesondere hinsichtlich der Auswirkungen auf die Abkühlkurven, sind im Bericht zu HAP2 detailliert beschrieben.

AP 1.3 – Thermomanagementstrategie und Rohdatenerzeugung für KI-Analyse

Aus AP1.1 und AP 1.2 sowie den erarbeiteten Optimierungsansätzen bzgl. Zeit-, Ökologie- und Abkühlgradient folgte die praxisnahe Verifizierung einiger Prozessmöglichkeiten, die sich aus der Stromquelle, den zur Verfügung stehenden Roboterachsen (Freiheitsgrade), des drahtabschmelzenden MIG (Metall-Inert-Gasschweißen) Verfahrens und anderer Kriterien ergaben.

Nachfolgend sind in der Abbildung auf der linken Seite reale Möglichkeiten der Start- und Stoppvarianten dargestellt, wobei sich punktförmige Strategien mit Cycle-Step von Fronius als geeignet herausstellten, um filigrane Wandstrukturen oder Data Matrix Codes für die Bauteilkennzeichnung zu generieren. Auch Helixstrukturen sind mit diesen Parametern darstellbar, da die hohe Energieeinbringung pro Volumenelement beim durchgängigen Lichtbogen verringert werden konnte. Beim Schweißen kleinerer Kurzstrukturen als Linie oder Mäander ergibt sich das Problem, dass die Start- und Stoppbedingungen ungünstig sind. Bei reinen Punkten ist die Punktform nahezu identisch. Daher wurden linien- oder mäanderförmige Kurznähte nicht weiterverwendet, außer wenn ein Layer von sich aus nur eine Kurzgeometrie enthält. Eine Variation des Startpunktes über Kreuz und je Layer ermöglichte im Projekt eine hinreichend ebene Layerausprägung.

Auswahlbeispiele Schweißstrategie WAAM



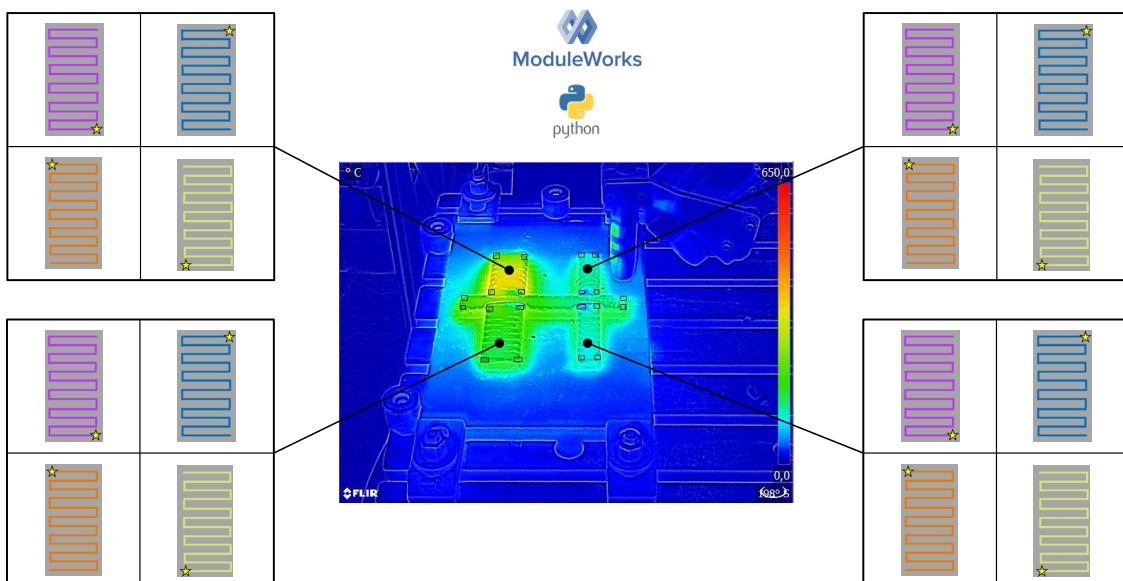
```

root:
  - lower_color: [] 3 items
  - upper_color: [] 3 items
  - rectangles: [] 20 items
  - 0: [] 4 items
    0: 217
    1: 127
    2: 225
    3: 335
  - 1: [] 4 items
  
```

Im Rahmen des Projekts wurden thermografische Auswertungen als Grundlage für weiterführende Untersuchungen zur prozessbegleitenden Datenerzeugung und zur Entwicklung einer geeigneten Thermografiestrategie für KI-basierte Analysen herangezogen. Ziel dieses Ansatzes war es, thermische Zustandsinformationen des Bauteils während des WAAM-Prozesses systematisch zu erfassen und für eine adaptive Prozessführung nutzbar zu machen. Kernidee hierbei war die thermische Auswertung definierter geometrischer Referenzpunkte innerhalb der aufzubauenden Struktur. Hierzu wurden ausgewählte Eckpunkte anhand des Pixelfarbmittelwerts in den thermografischen Aufnahmen analysiert. Auf Basis dieser Temperaturinformationen sollte der jeweils nächste Schweißort dynamisch bestimmt werden. In der aktuellen industriellen Praxis erfolgt die Auswahl der nächsten Schweißposition in der Regel ausschließlich geometriebasiert. Dies führt häufig zu nicht optimierten Wartezeiten zwischen einzelnen Schweißbahnen sowie zu unzureichend bekannten Zwischenlagentemperaturen über den gesamten Layer hinweg. In der Regel wird lediglich überprüft, ob eine definierte maximale Zwischenlagentemperatur – beispielsweise 250 °C – vor Beginn des nächsten Schweißvorgangs unterschritten wurde. Diese Vorgehensweise verhindert zwar potenzielle Bindefehler, ermöglicht jedoch keine zeitlich optimierte Prozessführung.

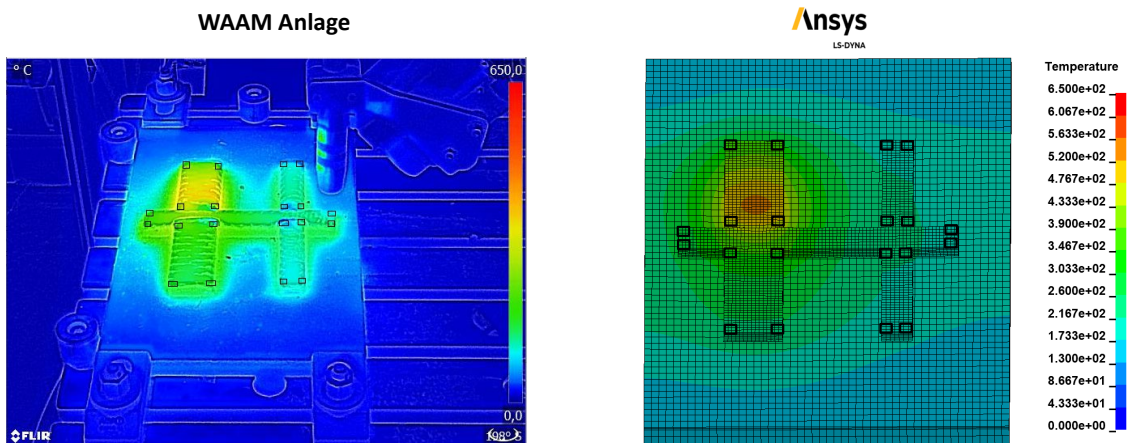
Zur praktischen Umsetzung des in diesem Arbeitspunkt entwickelten Ansatzes war eine automatisierte Generierung von Varianten des RoboterCodes erforderlich. Hierfür wäre eine geeignete Software zur simulationsgestützten Pfadprogrammierung notwendig gewesen, die zum Zeitpunkt des Projekts jedoch nicht kommerziell verfügbar war. Aus diesem Grund kooperierte HEGGEMANN im Berichtszeitraum mit dem Softwareunternehmen ModuleWorks, um Lösungsansätze für eine simulationsgestützte und parametrisierbare Pfadprogrammierung zu entwickeln. Neben der thermisch adaptiven Prozessführung konnten die hierbei entwickelten Strategien auch für weiterführende Zielstellungen, beispielsweise zur Minimierung von Bauteilverzug oder zur Optimierung von Eigenspannungszuständen, genutzt werden.

Die ersten Ergebnisse dieser Kooperation erwiesen sich als vielversprechend. Bereits in der zweiten Jahreshälfte 2023 wurden erste Versuchsreihen an der HEGGEMANN WAAM-Anlage durchgeführt. Dabei wurden mittels Python aufbereitete und transformierte Thermografiedaten als Grundlage für die Generierung der Pfadprogrammierungen verwendet. Die entsprechende Pfadplanung wurde anschließend mit Hilfe der Softwarelösungen von ModuleWorks erstellt. Die nachfolgende Abbildung zeigt schematisch die daraus resultierenden Bahnstrategien.



Durch die parametrische Beschreibung der Schweißpfade können im Vorfeld alternative Teilstrukturen definiert werden, zwischen denen abhängig von den gemessenen Sensordaten ausgewählt werden kann. Auf diese Weise wird eine adaptive Prozessstrategie ermöglicht, bei der die jeweils günstigste Teilstruktur in Abhängigkeit vom aktuellen thermischen Zustand des Bauteils ausgewählt wird. Eine vollständige Umsetzung dieses Ansatzes in Form eines direkten Streamings der Sensordaten in den Robotercode konnte im Rahmen des Projekts jedoch nicht mehr realisiert werden. Dies liegt unter anderem daran, dass gängige Roboterplattformen aus Sicherheits- und Stabilitätsgründen nicht ohne Weiteres während des laufenden Betriebs neu beschrieben werden dürfen. Für die Realisierung einer solchen dynamischen Prozessführung sind daher weiterführende Forschungsarbeiten erforderlich. Gleichzeitig eröffnet dieser Ansatz zusätzliche Perspektiven für eine zukünftige industrielle Verwertung, insbesondere im Kontext einer sensorbasierten, adaptiven Prozesssteuerung für WAAM-Prozesse.

Weitere Optimierungspotenziale durch die angepasste Aufbaustrategie ergaben sich im Projekt hinsichtlich der Betriebs- und Fatigue-Eigenschaften sowie einer möglichen Minimierung mehrachsialer Spannungszustände. Diese Ergebnisse eröffneten neue Möglichkeiten zur Temperaturfeldsteuerung, was direkten Einfluss auf das Arbeitspaket AP 1.4 des Projektpartners TUM hatte, da sich eine neue Datenbasis für die Anwendung von KI-Methoden ergab. Anschließend wurde bei HEGEMANN die gleiche Strategie in die Simulation übernommen und Knotensets gebildet, um die Pixelmasken nachzuempfinden und den Ort der nächsten Schweißung auch dort zu visualisieren. Nachfolgend ist die nach Abschluss dieses Arbeitspakets erzielte sehr gute Übereinstimmung der vorausgehenden Simulation (rechts in der Abbildung) mit den gemessenen Temperaturzuständen im Prozess (links) exemplarisch einmal dargestellt.



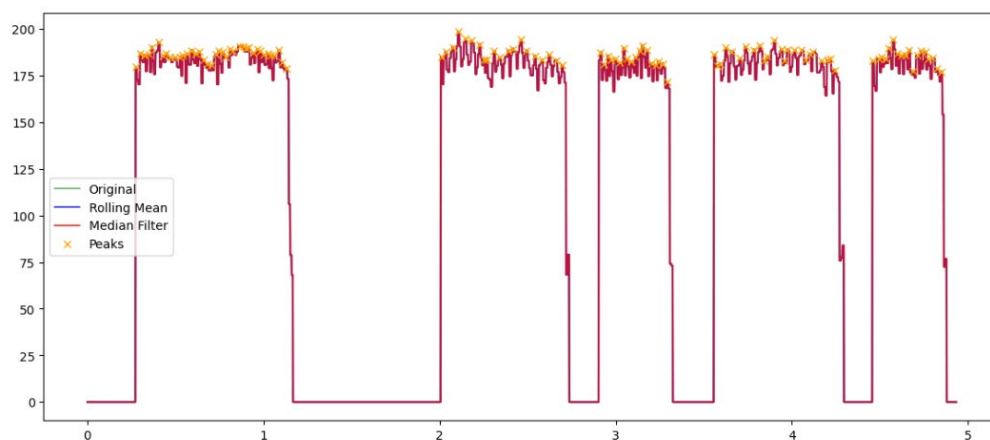
AP 1.4 – Validierung neuer KI-basierter Bahnplanungsstrategien an Versuchskomponenten mit steigender Komplexität

Im Rahmen dieses Arbeitspakets unterstützte HEGEMANN bei der Validierung neuer KI-basierte Ansätze zur Bahnplanung und Prozessanalyse an Versuchskomponenten mit steigender geometrischer Komplexität. Hierfür entwickelte der Projektpartner Technische Universität München (TUM) unter anderem Kreuzungsstrukturen sowie weitere charakteristische Geometrielemente, die insbesondere für die Untersuchung thermischer Wechselwirkungen innerhalb komplexer WAAM-Aufbaustrukturen geeignet sind.

Auf Basis dieser Versuchskörper wurde an der TUM ein neuronales Netz in Form eines Convolutional Neural Network (CNN) entwickelt und getestet, um aus bildbasierten Sensordaten Rückschlüsse auf die Zwischenlagentemperaturen während des WAAM-Prozesses zu ziehen. HEGGEMANN stimmte sich hierzu eng mit der TUM hinsichtlich der verwendeten Prozessparameter sowie deren Einfluss auf die thermischen Randbedingungen und die resultierende Bauteilqualität ab. Der bildbasierte Ansatz ergänzte die bis dahin verfügbaren Vorhersagemöglichkeiten, die überwiegend auf klassischen Schweißkennlinien basierten, und eröffnete zusätzliche Möglichkeiten zur datengetriebenen Prozessanalyse.

Im weiteren Verlauf der Datenauswertung zeigte sich, dass Sensordaten – insbesondere bei begrenzten Abtastraten oder kurzfristigen Signalstörungen – teilweise unvollständige Zeitreihen aufweisen können, obwohl der physikalische Prozess selbst kontinuierlich ablief. Zur Rekonstruktion solcher Datenlücken wurden Methoden des maschinellen Lernens eingesetzt, insbesondere Recurrent Neural Networks (RNN) sowie Transformer-Architekturen. Diese Ansätze eignen sich nicht nur für Anwendungen in der Sprach- und Textverarbeitung, sondern auch für die Analyse und Rekonstruktion eindimensionaler Zeitreihen, wie sie im Kontext von Schweißprozessdaten typischerweise auftreten. Auf diese Weise konnten zusätzliche KI-gestützte Vorverarbeitungsschritte zur Verbesserung der Datenqualität implementiert werden.

Die in Schweißversuchen aufgezeichneten Prozesssignale weisen häufig eine charakteristische rechteckförmige Signalstruktur auf, die aus dem periodischen Verlauf der Schweißstrom- und Spannungsverläufe resultiert. Für die Entwicklung belastbarer KI-Modelle zur Bahnplanung war daher ein gezieltes Feature Engineering erforderlich, um aus den Rohdaten diejenigen Merkmale zu extrahieren, die für die Modellbildung tatsächlich relevant sind. Hierzu wurden statistische Kenngrößen wie Mittelwerte und Standardabweichungen aus den Signalplateaus der aufgezeichneten Stromverläufe bestimmt und als Eingangsgrößen für die Modellierung verwendet. Darüber hinaus wurde der charakteristische rechteckförmige Verlauf der Prozesssignale, der insbesondere bei Mäanderbahnen auftritt, bei der Definition der Bahnvorhersageparameter berücksichtigt. Nachfolgend ist der Auszug eines typischen rechteckförmigen Schweißsignals im laufenden Prozess dargestellt. Die Einheit der y-Achse ist Ampere, auf der x-Achse ist die die Zeit in ms aufgetragen.



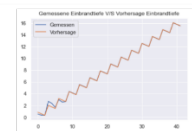
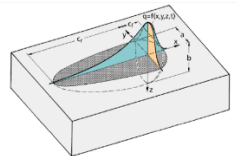
Ein weiterer Entwicklungsschwerpunkt lag auf der datengetriebenen Vorhersage von Zusammenhängen zwischen Prozessparametern und resultierenden Schweißguteigenschaften. Hierzu wurde ein Regressionsmodell entwickelt, das die Eingangsgrößen Schweißstrom [A] und Schweißgeschwindigkeit [mm/min] auf die resultierende Eindringtiefe bzw. Einbrandtiefe [mm] abbildet. Grundlage hierfür bildeten Einzelversuche, bei denen sowohl Prozessdaten aufgezeichnet als auch metallografische Schlibfbilder ausgewertet wurden. Aus diesen Daten konnte ein Vorhersagemodell trainiert werden, das eine Abschätzung der Einbrandtiefe in Abhängigkeit der gewählten Prozessparameter ermöglicht.

Die aus dem trainierten Modell gewonnenen Vorhersagen liefern zusätzliche Eingabedaten für die simulationsgestützten Untersuchungen im HAP 2 sowie für die praktische Prozessplanung im Realprozess. Dadurch kann der Umfang notwendiger Vorversuche reduziert werden. Ergänzend wurden Korrelationsanalysen der relevanten Prozessparameter durchgeführt und in Form einer Korrelationsmatrix dargestellt. Die Ergebnisse wurden zudem genutzt, um die geometrischen Parameter der in der Simulation verwendeten Wärmequellenmodelle zu kalibrieren. Hierzu wurden die geometrischen Abmessungen der Wärmequelle anhand der Schweißgutausrprägungen aus den metallografischen Schlibfbildern rückgeführt und angepasst.

Die für die Simulation aus den Probenreihen abgeleiteten Kennwerte und Eingangsgrößen sind in der folgenden Abbildung auf der rechten Seite dargestellt.



	Welding Current [A]	Welding Speed [mm/min]	Depth of Penetration [mm]
count	42,000000	42,000000	42,000000
mean	115,000000	500,000000	2,209627
std	40,799928	62,639387	4,774790
min	50,000000	400,000000	0,330000
25%	80,000000	400,000000	4,176250
50%	115,000000	500,000000	8,205834
75%	150,000000	600,000000	12,230417
max	180,000000	600,000000	16,258480
-3_std	237,399785	742,918161	22,520782
-3_std	-7,399785	232,981839	-6,119415



HAP 2 – Implementierung digitaler Zwilling

In HAP 2 wurde die thermo-mechanische Simulation aus dem REGULUS Projekt (Prototyp) zum Digitalen Zwilling im Hinblick auf eine spätere Echtzeitfähigkeit weiterentwickelt. Insbesondere die Skalierbarkeit, die Verwendung von realen Werkzeugwegen, der Export von RapidCode für ABB und die Verbindung zum Digitalen Zwilling der TU München waren Teilaufgaben in den jeweiligen Arbeitspaketen. Weiterhin konnten reale Prozessdaten verwendet und Hilfsgrößen ermittelt werden, die einer Bahnplanung mit Optimierungskriterien entsprach.

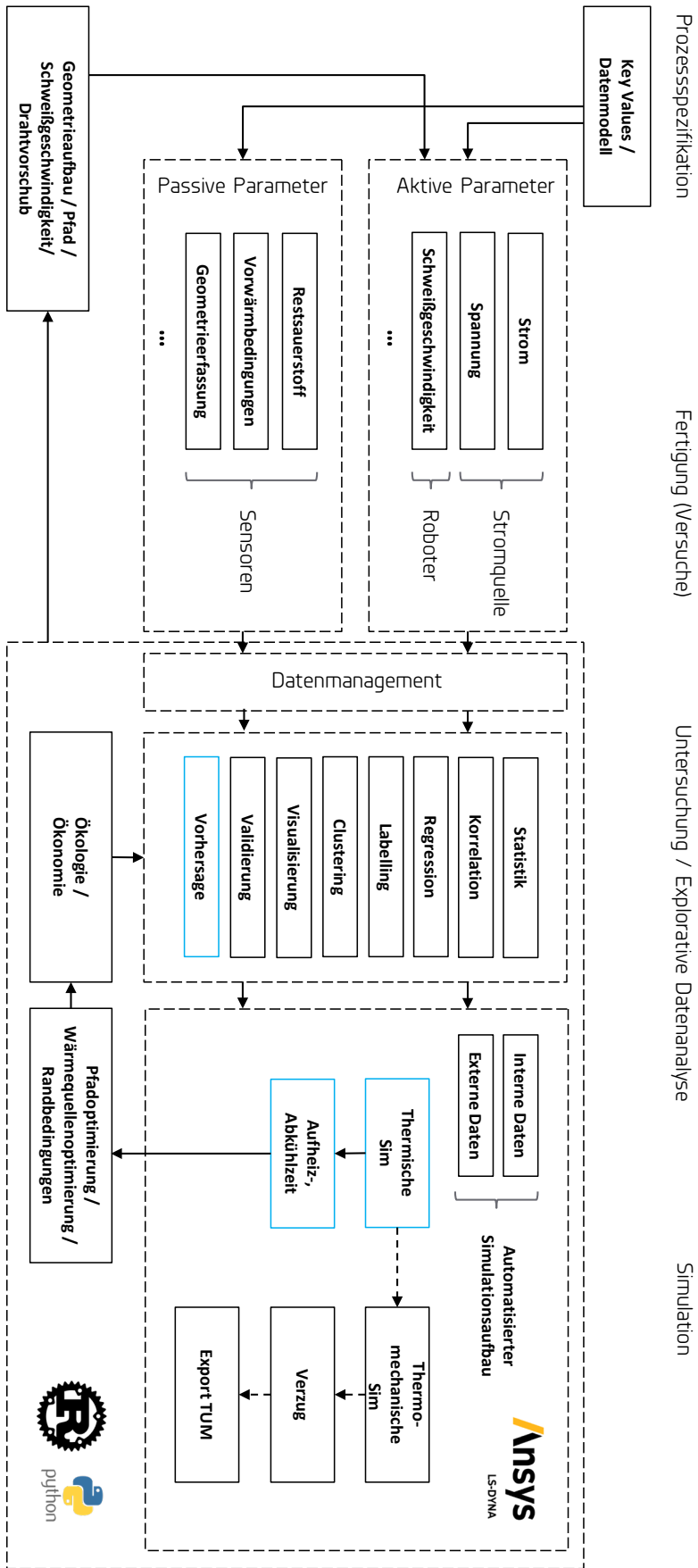
AP 2.1 – Aufbau digitaler Zwilling zur Evaluation des Thermohaushalts

Im Arbeitspaket AP 2.1 lag der Schwerpunkt der Arbeiten auf dem Aufbau eines digitalen Zwillings zur Berechnung und Analyse des thermischen Prozesshaushalts im WAAM-Prozess. Hierzu arbeitete sich HEGGEMANN intensiv in die Simulationssoftware LS-DYNA ein. Diese Software wird unternehmensintern bereits für die Simulation von Titan-Warm- und Kaltumformprozessen eingesetzt, sodass auf vorhandene Erfahrungen sowie auf in den vergangenen Jahren experimentell ermittelte Materialkennwerte zurückgegriffen werden konnte.

Der zugrunde liegende Multiphysik-Kern wurde durch geeignete Materialmodelle sowie entsprechende Eingabedateien konfiguriert und erweitert. Auf dieser Basis konnten sowohl thermische als auch mechanische Effekte des WAAM-Prozesses numerisch abgebildet werden. Die Simulation lieferte dabei die relevanten Systemantworten hinsichtlich Temperaturverteilung, thermischer Belastung sowie mechanischer Beanspruchung während des additiven Fertigungsprozesses. Im Unterschied zu klassischen FEM-Simulationen wurden die berechneten Systemantworten nicht isoliert betrachtet, sondern in eine übergeordnete Systemarchitektur integriert. Innerhalb dieses erweiterten Ansatzes wurden die Simulationsergebnisse als Bestandteil eines umfassenderen digitalen Prozessmodells genutzt. Dabei erfolgte eine Einbettung in einen Workflow, der neben der Simulation auch Automatisierungs- und Datenverarbeitungsbausteine umfasst. Dieser Ansatz ermöglicht eine durchgängige Verknüpfung von Prozessdaten, Simulationsergebnissen und automatisierten Auswertungen.

Die entwickelte Methodik ist grundsätzlich generisch ausgelegt und kann auf unterschiedliche Fertigungsressourcen übertragen werden. Im Rahmen dieses Arbeitspaketes wurde dieser Ansatz in mehreren Iterationsschleifen weiterentwickelt und als zentraler Baustein für eine datenbasierte Qualitätssicherung in Fertigungsprozessen erarbeitet. Insbesondere bei Prozessen, bei denen während der Fertigung kontinuierlich Daten generiert und ausgewertet werden können, bietet die Integration eines digitalen Zwillings ein erhebliches Potenzial zur Verbesserung der Prozessstabilität und Nachvollziehbarkeit.

Nach erfolgreicher Integration des digitalen Zwillings in die gesamte WAAM-Fertigungszelle konnte eine Systemarchitektur realisiert werden, in der Eingangs- und Ausgangsgrößen über mehrere Instanzen miteinander verknüpft sind. Die nachfolgende Abbildung gibt einen Überblick über diese Systemstruktur sowie über die Kopplung der Eingabe- und Ausgabeseite innerhalb des entwickelten digitalen Prozessmodells.



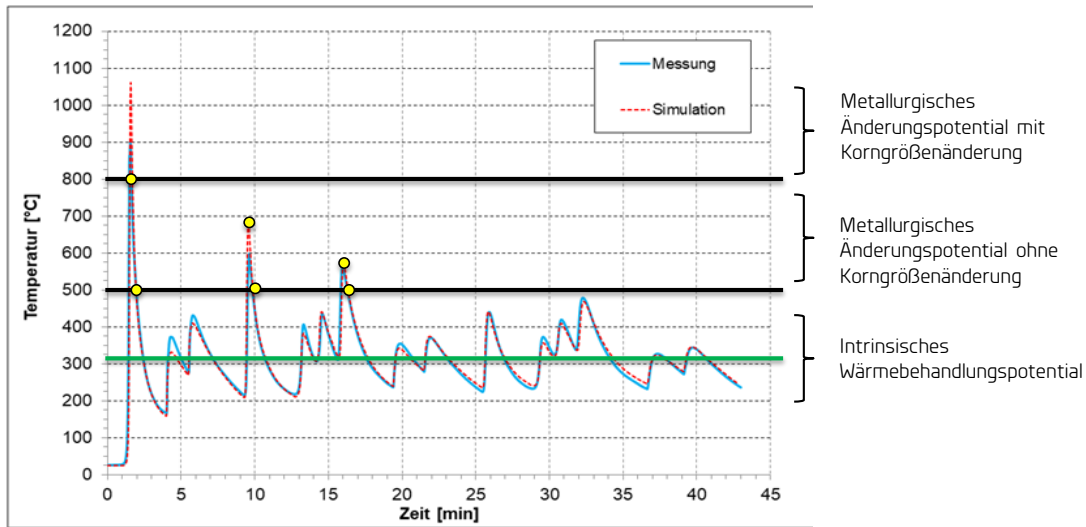
Der entwickelte Workflow gliederte die Prozessparameter in zwei Gruppen: aktive Parameter, die vordefiniert angepasst und überwiegend zeitlich variabel erfasst wurden (zeitbasierte Datenbanken), sowie passive Parameter, die feste Randbedingungen oder weitgehend konstante Größen darstellten. Das Datenmanagement umfasste die Erfassung, Speicherung, Weiterleitung und Aufbereitung der Prozessdaten. Für statistische Analysen, Korrelationen, Visualisierungen und maschinelle Lernverfahren wurden Vorfilterungen, Transformationen und Ersetzungen vorgenommen, um die Daten mit den mathematischen Funktionen kompatibel zu machen. Dazu gehörte insbesondere der Umgang mit fehlenden oder inkonsistenten Daten, irrelevanten Ausreißern sowie die Entfernung wiederkehrender Signalanteile oder Trends, um die zugrunde liegende statistische Verteilung und Prozessabweichungen zuverlässig zu erkennen. Zur Standardisierung der Datenaufbereitung wurden Vorlagen (Templates) genutzt und mittels Python-Bibliotheken (Pandas, Polars) in gefilterten Data Frames umgesetzt.

Die Möglichkeiten zur Reduzierung der Datenmengen wurden intensiv untersucht und bearbeitet, da Umfang und Struktur der WAAM-Prozessdaten stark von Abtastrate und eingesetzter Software abhängen. Eine wesentliche Maßnahme war der Wechsel der Programmiersprache für rechenintensive Abschnitte: Während Python Vorteile durch kostenlose Bibliotheken, große Community und einfache Integration grafischer Benutzeroberflächen bietet, führten bei der Verarbeitung großer Datenmengen – z. B. Berechnung von Abkühlzeiten (Titan t10/6, Stahl t8/5) für jeden Knoten – hohe Rechenzeiten zu Skalierungsproblemen bei größeren Bauteilen. Zur Handhabung der Daten aus LS-DYNA (binout-Dateien) wurden die Outputdateien aufgeteilt, um die Größe einzelner Dateien zu begrenzen. Für fünf Schichten der H-Probe entstanden so 15 Dateien mit insgesamt 17 GB. Bei der vollständigen H-Probe mit 75 Schichten ergibt sich damit eine prognostizierte Datenmenge von ca. 255 GB, was die Notwendigkeit effizienter Datenmanagement- und Rechenstrategien verdeutlicht. Der in der folgenden Tabelle gezeigte Vergleich der Rechenzeiten verdeutlicht dies anschaulich:

Daten	Elemente	Dateigröße	Verarbeitungsgeschwindigkeit Python [s]	Optimierung in Rust [s]
Zeitschritte	2642	17GB in 15 Einzeldateien	71	-
Abkühlzeiten	57434		3600	60

Durch die Änderung des Algorithmus mit Rust und die Optimierung durch Vermeidung rechenintensiver Operationen (z. B. Division in Vektoren) wurde eine Rechenzeitverringerung von 60 Minuten auf 1 Minute erreicht. Die Extraktion der Zeitschritte war noch nicht optimiert, da hierfür weitere Anpassungsprogrammierungen in der Python-Bibliothek zum Auslesen von binout-Daten der Fa. Dynamore erforderlich gewesen wären. Diese Verarbeitung führt zu einer Ergebnisdatei der Abkühlgradienten an jedem Netzknoten, die im Kilobytebereich liegt, daher lohnt sich die Datenverarbeitung.

Das Ziel in diesem Arbeitspaket war es unter anderem, die Voraussetzungen zu schaffen, um die Aufheiz- und Abkühlzeiten im digitalen Zwilling darstellen zu können. Dafür wurde die bis dato aufgebaute Simulation frühzeitig mit Thermoelementen validiert. Die nachfolgende Abbildung verdeutlicht dies und zeigt, welche metallurgischen Änderungspotenziale (die beiden schwarzen horizontalen Linien) und Wärmebehandlungsvorgänge (grüne horizontale Linie) für einen Knoten in der Struktur bestanden (hier: Stahl G4Si1).



Für die im Projekt angedachten Bauteilgrößen von bis zu 1 m Länge wurden im Projektverlauf weitere Vereinfachungen zur Reduzierung der Datenmengen eruiert. Folgende Ansätze konnten hierzu erarbeitet werden:

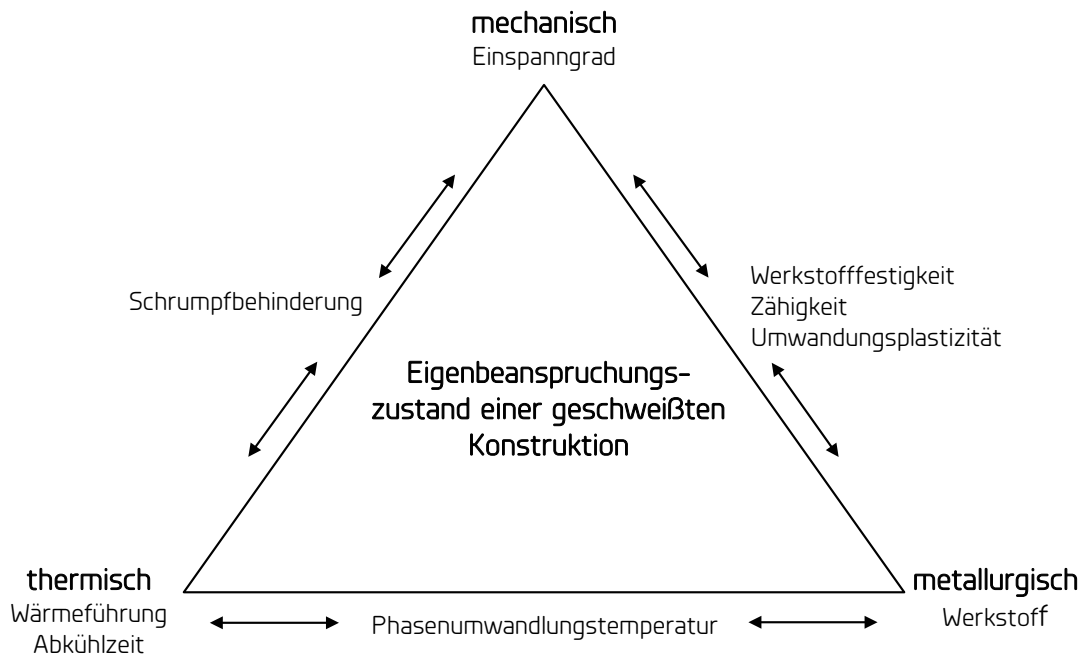
1. Adaptive Netzgröße mit Entfernungssteuerung der aktuellen Wärmequellenposition
2. Verzicht auf die Berücksichtigung der Substratplatte und Verwendung von Machine Learning (ML), um je nach Parametern eine Ersatzgröße für den Temperaturübergang im Modell zu verwenden, ohne eine aufwändige Vernetzung im Struktur-Substratplatten-Übergang
3. Verwendung eines Mix aus 2-dimensionalen und 3-dimensionalen Wärmeleitgleichungen mit theoretisch abgeleiteter Übergangsblechdicke zur Verringerung von Simulationsanteilen
4. Genauere Auflösung nur kritischer Bereiche (Submodellbildung)
5. Betrachtung neuronaler Netze (Physics informed neural networks), die insgesamt ein hohes Potential für Echtzeitfähigkeit besitzen, allerdings im Rahmen von QuSAM nur ansatzweise getestet werden konnten

Weiterführend wurden über die Pfadoptimierungen hinaus angepasste Vorgehensweisen erarbeitet. So entstand je Use Case ein Workflow für den digitalen Zwilling, der als Template vorbereitet wurde.

AP 2.2 – Implementierung einer thermo-mechanischen Simulation zur Einhaltung der Geometrietreue

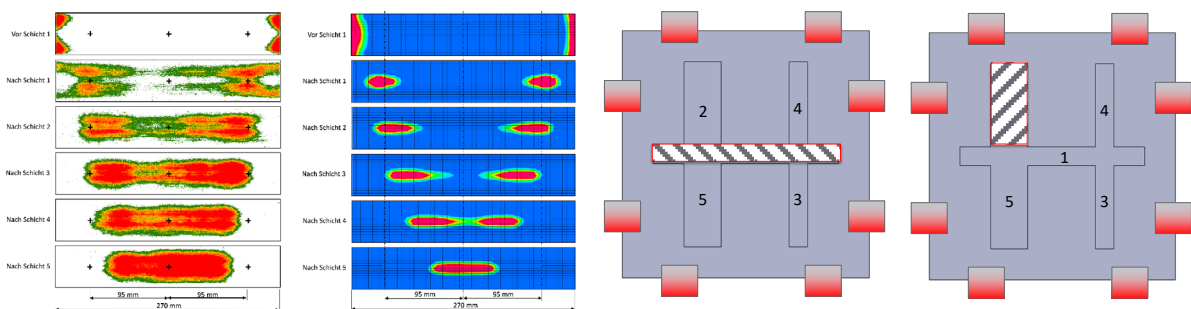
Ziel dieses Arbeitspakets war die Implementierung einer thermo-mechanischen Prozesssimulation zur Sicherstellung der Geometrietreue von WAAM-Bauteilen. Die Simulation bildet einen zentralen Bestandteil des digitalen Zwillings und geht über eine klassische FEM-Berechnung hinaus. Dadurch kann eine Systemgrenze definiert werden, deren Abbildung zunehmend der physikalischen Fertigungsressource entspricht. Die thermophysikalische Modellierung basiert auf der Verknüpfung des ersten Hauptsatzes der Thermodynamik mit dem Fourierschen Gesetz der Wärmeleitung und wird durch einen Produktionsterm der volumetrischen Wärmequelle erweitert.

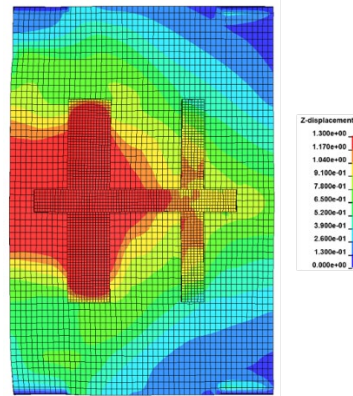
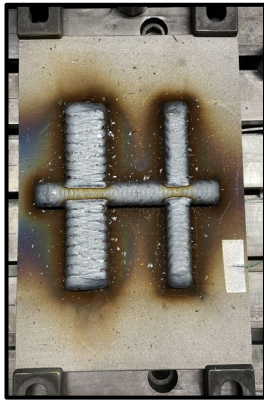
Jede Wärmeeinwirkung auf das Bauteil erzeugt ein komplexes System gegenseitig beeinflussender Faktoren, die thermisch, mechanisch und metallurgisch miteinander verknüpft sind. Die daraus resultierenden Wechselwirkungen und Abhängigkeiten wurden im Arbeitspaket AP2.2 systematisch untersucht und sind im Folgenden gemäß [Neu] dargestellt.



HEGGEMANN hat die Geometrietreue anhand der mechanischen Kopplung aus den in AP2.3 näher beschriebenen T8/5 Zeiten ermittelt und mit dem Projektpartner TUM abgestimmt. Unter dem Aspekt der Qualitätsabsicherung über Digitale Zwillinge waren und sind diese Ergebnisse für die Arbeiten von großem Interesse, weil sie Einblicke in die Positionierung von Spannelementen auf der Bauplattform geben.

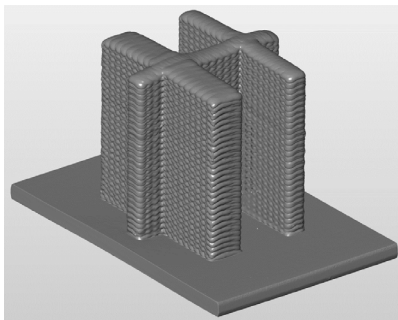
Dabei wurden zur Verzugskompensation an Einzelgeometrien Vorversuche gemacht mittels Druckfolie (1. Links) und deren simulative Abbildung in LS-Dyna (2. Links) und der variablen Temperaturführung (3. und 4. Links), siehe erste Reihe der nachfolgenden Tabelle. Dies wurde nach der Optimierung der Reihenfolge für t8/5-Zeiten nochmal für das gesamte Bauteil gemacht und konnte anschließend für geänderte Wärmeleitbedingungen herangezogen werden und zur Reduzierung des Bauteilverzuges und der Eigenspannungsbetrachtungen, siehe zweite Reihe.



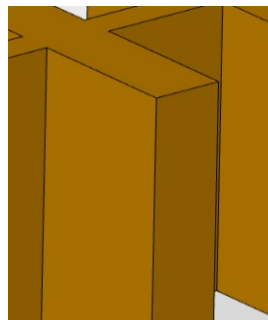


Die Untersuchungen zeigten, dass die Berücksichtigung von Bauteilverzug primär für eine realistische Abbildung der Wärmeleit- und Temperaturverteilung innerhalb der additiv aufgebauten Schichten erforderlich ist, und nicht ausschließlich zur Anpassung des Bauteils an die Sollgeometrie oder zur Optimierung der Buy-to-Fly-Ratio dient. Ohne die explizite Modellierung des Verzugs treten insbesondere in den unteren Lagen signifikante Abweichungen auf. In höheren Lagen verringert sich der Effekt aufgrund des zunehmenden Wärmeleitwiderstands der bereits aufgebauten Layer. Der Eintrittspunkt des Verzugs hängt dabei materialabhängig von den thermophysikalischen Eigenschaften des Werkstoffs ab.

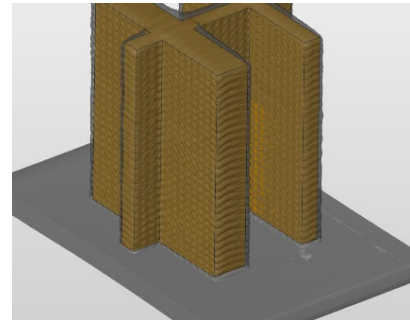
Der finale Modellstand wurde anhand der H-Probe validiert, die gleichzeitig als Referenz für die Schnittstellendefinition im Arbeitspaket AP 2.3 diente. Das zwischenzeitlich generierte Datenformat basiert entweder auf gängigen CAD-Standards oder dem HyperMill-Datenformat, wie nachfolgend dargestellt, und ermöglicht eine nahtlose Integration in nachfolgende Simulations- und Fertigungsprozesse.



gescannte H-Probe



Endkontur mittig



Endkontur in Druckteil

[Neu]	S. Neubert: Simulationsgestützte Einflussanalyse der Eigenspannungs- und Verzugbildung beim Schweißen mit artgleichen und nichtartgleichen Zusatzwerkstoffen, Dissertation, Berlin, 2018
-------	--

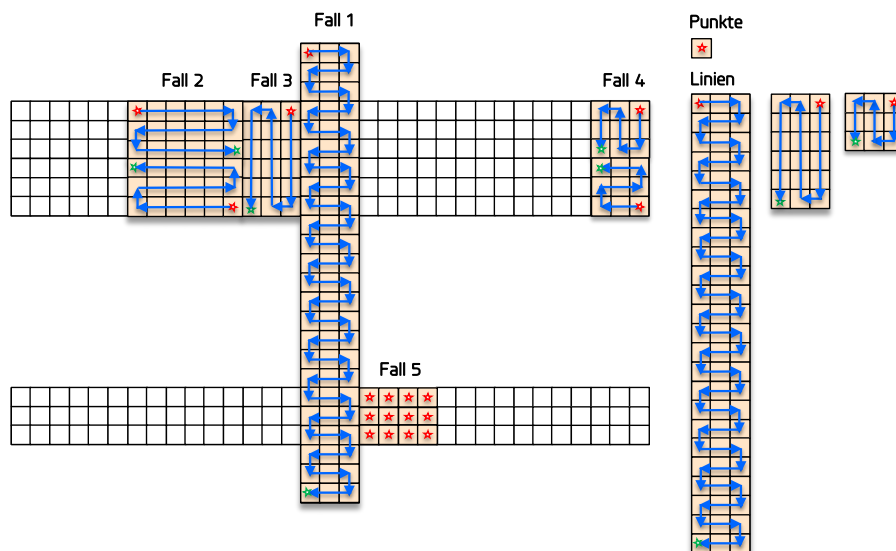
AP 2.3 – Simulation der Erreichbarkeit und Homogenität von Zielgrößen unter Berücksichtigung des Thermohaushalts

Zur Erreichung homogener Zielgrößen wurden im Projektverlauf unterschiedliche Fertigungs- und Bahnplanungsstrategien untersucht. Die Aufgabe gestaltete sich aufgrund der eingeschränkten Steuerungsmöglichkeiten der verfügbaren Bahnplanungssoftware sowie prozesstechnischer Randbedingungen als besonders anspruchsvoll. Um diese Einschränkungen zu adressieren, wurden Simulationen mit mathematischen Optimierungsansätzen, digitaler Mustererkennung und maschinellen Lernverfahren kombiniert. Hierzu wurden Funktionen aus der Simulation und der Programmiersprache Python in iterativen Schleifen integriert, um die Bahnplanung systematisch zu optimieren. Zur Veranschaulichung wurden fünf Musterfälle analysiert:

- Fall 1 zeigt die konventionelle durchgeschweißte Struktur mit gelegentlicher Layerdrehung.
- Fall 2 bis 4 demonstrieren die Anwendung beliebig kleiner, mittelgroßer, symmetrischer und unsymmetrischer Muster.
- Fall 5 nutzt die CycleStep-Funktion der Fronius CMT-Stromquelle und erzeugt nahezu kugelförmige Umschmelzungen. Dieses Muster ist zwar prinzipiell möglich, führt jedoch zu häufigen Wiederezündungen und einer Aneinanderreihung kreisförmiger Strukturen, wodurch die Anfälligkeit für Bindefehler und Porositäten steigt.

Schematisch sind diese fünf Fälle in der nachfolgenden Abbildung grafisch veranschaulicht.

Auswahlbeispiele Schweißstrategie WAAM



Symmetrische und teilweise gedrehte Linienmuster, wie in Fall 4, zeigen, dass mit zunehmender Komplexität der zusammengesetzten Muster die Möglichkeiten zur thermischen Prozessbeeinflussung abnehmen, gleichzeitig jedoch die Prozessstabilität steigt. Instabile Prozesse, die Bindefehler provozieren, führen zu makroskopischen Unregelmäßigkeiten, die selbst grundlegende Werkstoffeigenschaften gefährden. Auf Basis dieser Erkenntnisse wurde zunächst eine kombinierte, stabile Strategie gewählt, die in späteren Simulationen durch theoretische Optimierungen weiter verfeinert werden kann. Auf diese Weise lässt sich die Homogenität der Zielgrößen unter Berücksichtigung des Thermohaushalts systematisch verbessern und für komplexe Bauteilgeometrien skalieren.

AP 2.4 – Definition eines optimierten Prozessfensters für die qualitätssichere Skalierbarkeit

Dieses Arbeitspaket baute auf den Vorentwicklungen aus AP2.3 auf und hatte zum Ziel, im WAAM-Prozess ein definiertes Gefügefenster zu realisieren, wie es typischerweise aus Zeit-Temperatur-Umwandlungsdiagrammen (ZTU) abgeleitet wird. Aufgrund der charakteristisch hohen Aufheiz- und Abkühlraten beim Schweißen wurden speziell Schweiß-ZTU-Diagramme verwendet, die die thermischen Randbedingungen des WAAM-Prozesses präziser abbilden. Daraus leitete sich das Ziel ab, die Bahnplanung so zu optimieren, dass ein definierter Homogenisierungsgrad der Mikrostruktur erreicht und somit die Einhaltung der Gefügeentwicklungsspielräume unter Berücksichtigung internationaler Normen sichergestellt wird.

Die entwickelten Optimierungsmaßnahmen gliederten sich dabei in drei aufeinander aufbauende Bereiche:

1. Geometrieorientierte Bahnplanung: Diese fokussierte auf eine lagenkonsistente Fertigung unter Berücksichtigung der geometrischen Stabilität hinsichtlich Lagenhöhe und Mindestwanddicke. Start- und Stoppunkte, Richtungswechsel des Brenners je Lage sowie diagonal versetzte Startpunkte wurden gezielt eingesetzt, um lokale Materialanhäufungen und geometrische Inhomogenitäten zu vermeiden und damit die Reproduzierbarkeit der Bauteilqualität zu gewährleisten.
2. Thermisches Management zwischen den Lagen: Hierbei wurden Abkühlzeiten sowohl als aktiv steuerbare Produktionsgröße als auch als prozesstechnische Randbedingung betrachtet. Durch die gezielte Wahl der Starttemperaturen beim Wiederründen des Lichtbogens konnten Bindefehler infolge unzureichender Aufschmelzung vermieden werden.
3. Kontrolle des gesamten Abkühlverlaufs: Der thermische Verlauf über den Fertigungsprozess wurde so gesteuert, dass die angestrebten Gefügezustände reproduzierbar erreicht und die thermisch beeinflussten Zonen innerhalb der normativen Grenzen gehalten werden.

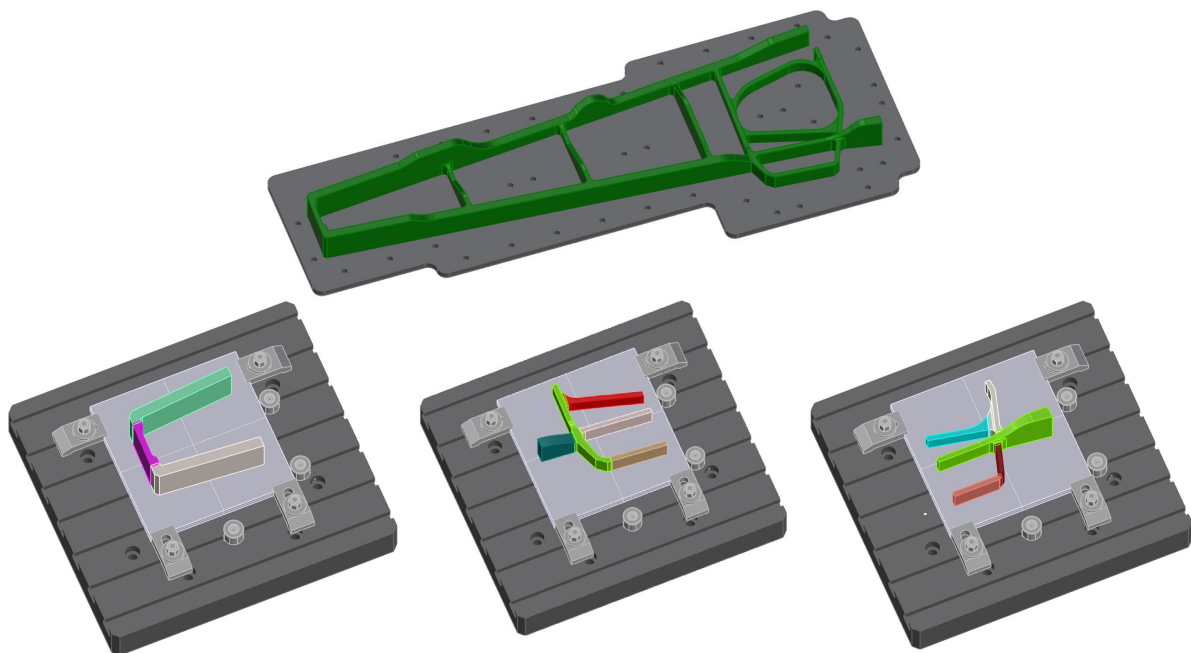
Die Validierung der entwickelten Bahnplanungsstrategien erfolgte anhand mikrostruktureller und mechanischer Zielgrößen unter Berücksichtigung unterschiedlicher Geometriekomplexitäten. Verschiedene Strategien wurden vergleichend bewertet, um den Einfluss auf Gefügeentwicklung und Bauteileigenschaften zu quantifizieren. Ergänzend wurden Eigenspannungsmessungen aus AP2.2 herangezogen, wobei sowohl relative prozentuale Veränderungen durch die Bahnoptimierung als auch absolute Restspannungen bewertet wurden, um den tatsächlichen Optimierungsgrad und verbleibendes Verbesserungspotenzial zu erfassen.

Für den Demonstrator ergaben sich mehrere Überlappungen zur sicheren Anbindung, die in Einzelversuchen vorab erprobt wurden (siehe nachfolgendes Arbeitspaket).

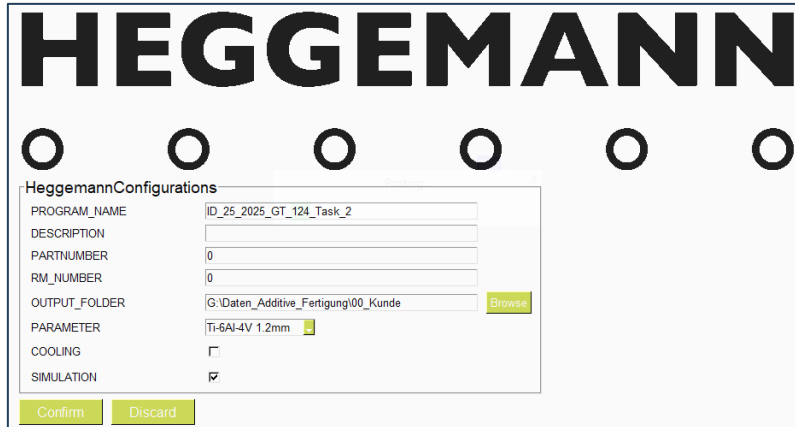
AP 2.5 – KI-basierte Bahnplanungsstrategie und WAAM-Parameteroptimierung

Ziel dieses Arbeitspakets war die Entwicklung einer automatisierten Bahnstrategie für den WAAM-Prozess, die mindestens für den manuellen Betrieb eine eigenständige Vorauswahl der Prozessparameter auf Basis des digitalen Zwillings ermöglicht. Als Eingangsdaten dienten Trainingsdaten, die aus den Vorergebnissen der HAP 2-Arbeitspakete, aus AP 1.3 sowie insbesondere aus AP 4.2 erzeugt und in aufbereiteter Form als JSON-Datensätze bereitgestellt wurden. Neben der Entwicklung der automatisierten Strategie selbst umfasste das Arbeitspaket die Beurteilung der entwickelten Strategieanpassungen sowohl im digitalen Zwilling als auch im realen Versuch sowie die Bewertung der erzeugten Bahnplanungsstrategien hinsichtlich mikrostruktureller und mechanischer Zielgrößen unter Berücksichtigung unterschiedlicher Geometriekomplexitäten.

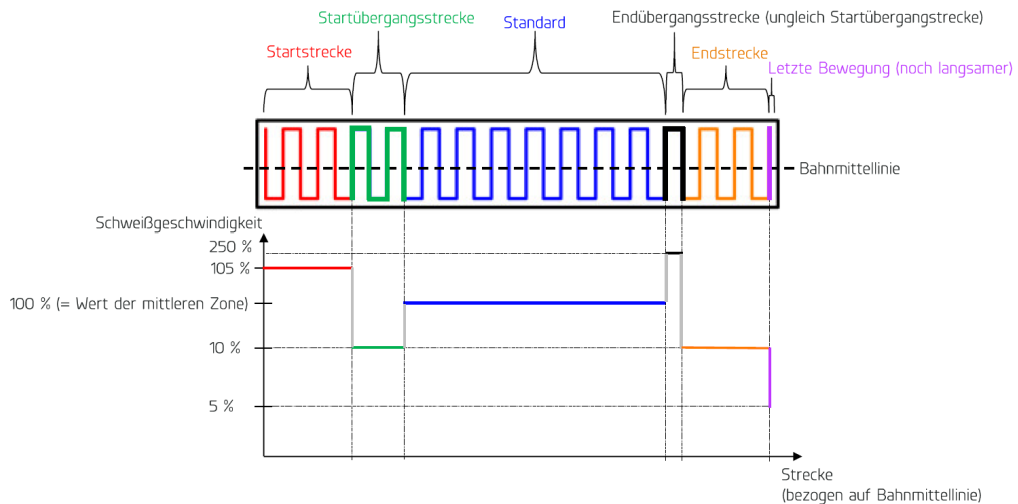
Ein erster inhaltlicher Schwerpunkt lag auf der Erarbeitung der Automatisierungspotenziale durch den Aufbau eines automatisierten Modellierungsablaufs. Dieser umfasste die gezielte Vorauswahl der Werkstoffparameter, die automatisierte Vernetzung, das Slicing der CAD-Geometrie sowie die Parametrierung der Bahnplanung. Die hierfür benötigten Eingangsgrößen lagen aus früheren Arbeitspaketen bereits im sogenannten JSON-Format strukturiert vor, was eine weitgehend automatisierte Weiterverarbeitung ermöglichte. Für das automatische Slicing der CAD-Geometrien wurden verschiedene Ansätze erprobt: Zum einen wurde eine skriptbasierte Lösung in Rhino und Grasshopper unter Nutzung der gemessenen durchschnittlichen Lagenhöhen als Steuerungsgrundlage entwickelt, zum anderen wurden reine Python-Implementierungen untersucht. Ergänzend wurde geprüft, inwieweit bestehende Bahnplanungssoftware die Möglichkeit bietet, einzelne Layer bereits als Geometrie direkt zu extrahieren und so den Automatisierungsgrad weiter zu erhöhen. Die Strukturelemente des Demonstrators mit einer Gesamtlänge von ca. 1.200 mm, siehe nachfolgende Abbildung, profitierten durch die Automatisierung direkt davon, wodurch sich die Einrichtungszeit und Vorauswahl von ca. 2h auf ca. 1min reduzierte.



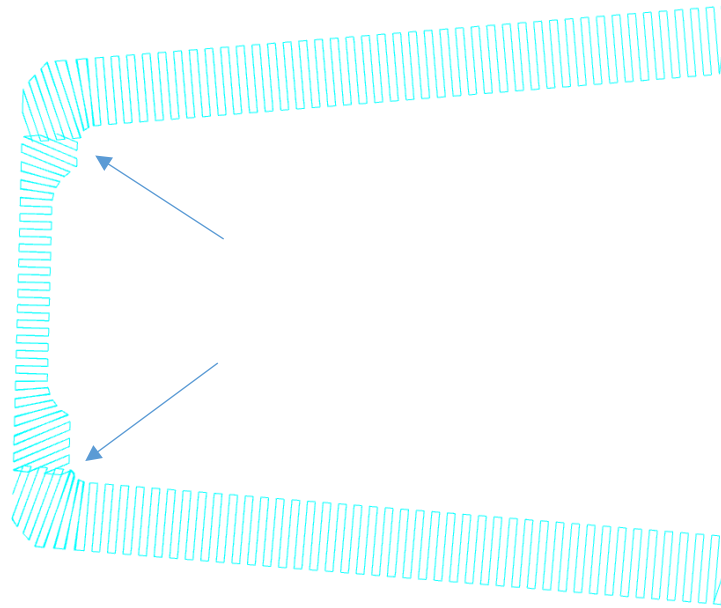
Alle im Arbeitspaket betrachteten Bauteile mit vergleichbarer Dimensionalität, in diesem Fall 2.5D, profitierten davon und konnten prozessreu simuliert werden. Um das zu erreichen wurden wesentliche Eingaben aus dem JSON-File direkt als Softwarevoreinstellung weiterverwendet (siehe nachfolgende Abbildung: „HEGGEMANN Configurations“).



Die Bahnpfaderzeugung erfolgte anschließend anhand definierter geometrischer Vorgaben wie Hatch-Abstand, Wandbreite und Nahtlänge auf Basis eines Bounding-Box-Ansatzes. Besondere Herausforderungen stellten dabei die Realisierung von Richtungswechseln und diagonal versetzten Startpunkten sowie die Entwicklung adaptiver Start- und Endzonen dar (siehe nachfolgende Abbildung).

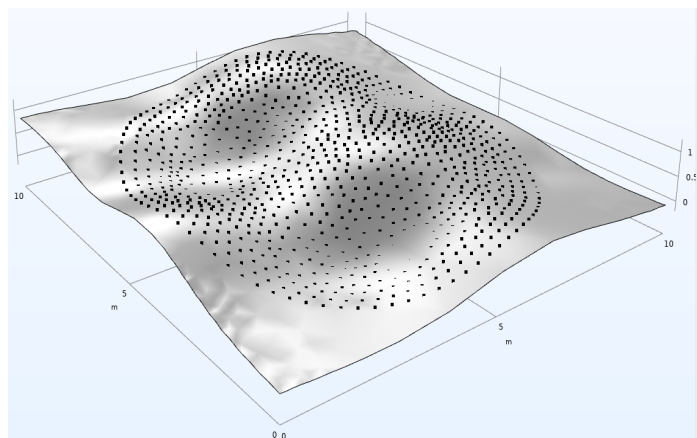
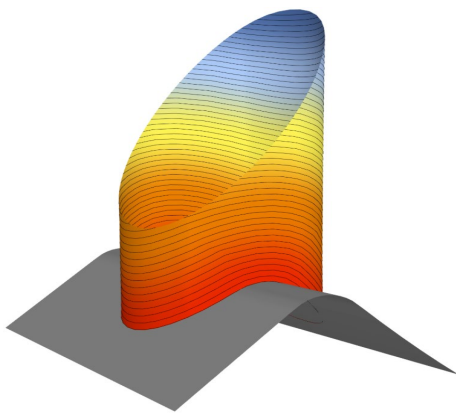


Damit sollen prozessbedingte Instabilitäten an den Bahnenden, wie in der folgenden Abbildung anhand der Bahnplanung grafisch veranschaulicht, kompensiert werden können.



Parallel dazu wurden Versuche mit den ebenfalls zuvor im Projekt entwickelten verschiedenen Kühlstrategien durchgeführt, um deren Einfluss auf die resultierenden Bauteileigenschaften zu bewerten. Im Rahmen dieser Versuche erfolgten zudem Eigenschaftsbestimmungen sowie chemische Abbrandbestimmungen, um den werkstoffseitigen Einfluss unterschiedlicher thermischer Prozessführungen zu quantifizieren. Als übergeordnetes Entwicklungsziel wurde der Aufbau einer kontinuierlichen, skriptbasierten Ablauffolge angestrebt, die die einzelnen Prozessschritte von der CAD-Geometrie bis zur fertigen Bahnplanung in einem durchgängigen automatisierten Workflow zusammenführt. Dies konnte im Rahmen des Arbeitsplans erfolgreich umgesetzt werden. Die Komplexitätserhöhung auf 3D ist nach Projektabschluss im Rahmen einer industrialisierbaren Weiterentwicklung nach Projektbeendigung geplant.

Auch wurden im Rahmen der Projektarbeiten einige neue Herausforderungen entdeckt, wie die Berücksichtigung und simulative Darstellung unebener non-planarer Bahnbedingungen, welche wiederum zu no-planare Slicingebenen und Bounding Boxes führen (siehe folgende Abbildung).

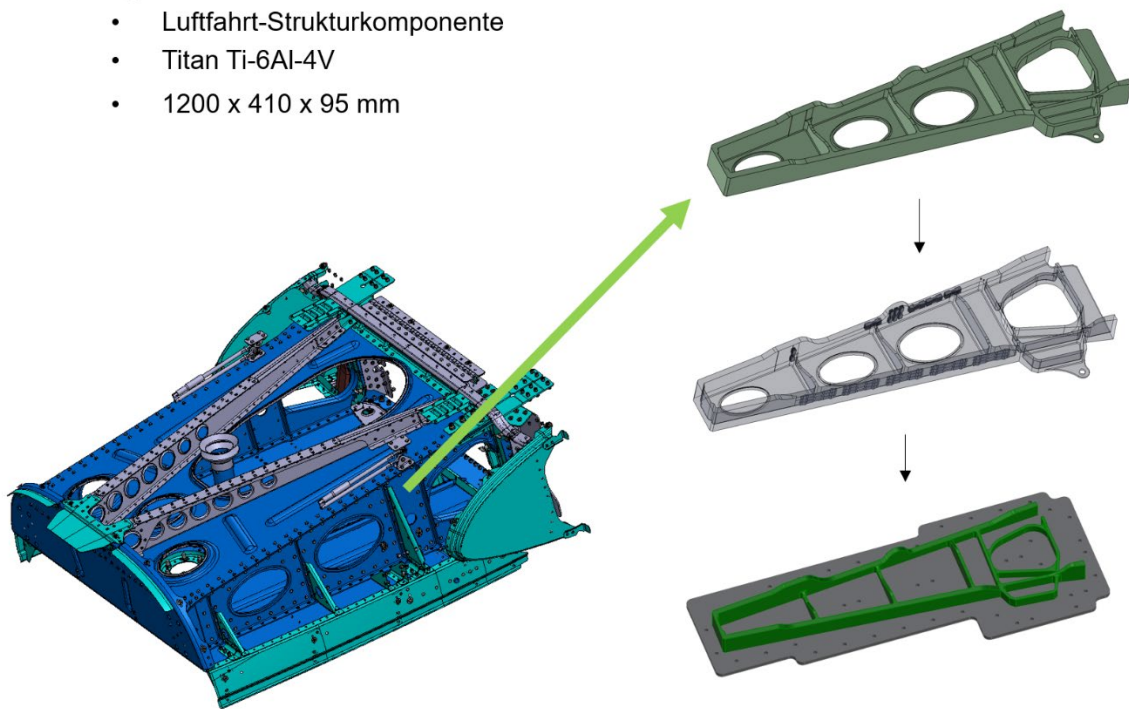


Die Vorauswahl der Prozessparameter wurde auf Basis von Klassen vorgenommen, die aus KI-gestützten Voruntersuchungen der vorliegenden Datenbasis gebildet wurden. Dieser Ansatz ermöglichte es, die Parameterauswahl nicht mehr rein empirisch zu treffen, sondern auf Grundlage datengetriebener Muster aus dem bestehenden Prozesswissen zu automatisieren und damit den Grad der Bedienerunabhängigkeit der Bahnstrategie wesentlich zu erhöhen.

Auf Basis der in diesem Arbeitspaket generierten Skalierungsansätze wurde in Abstimmung mit den Verbundpartnern und dem Input des assoziierten Partners Boeing die nachfolgend dargestellte Geometrie in Anlehnung an eine reale Titanluftfahrtstruktur entwickelt, simuliert und für den WAAM-Prozess optimiert. Ebenso wurde die erforderliche Bahnplanung des Roboters auf Grundlage der Simulationsergebnisse iterativ umgesetzt. Die Herstellung der WAAM-Struktur auf der WAAM-Anlage bei HEGGEMANN startete mit entsprechenden Vorversuchen zur Absicherung der kritischen Geometriebereiche in der Projektlaufzeit. Die Fertigstellung des Demonstrators in Hardware wurde nach Projektabschluss bei HEGGEMANN intensiv weiterverfolgt.

Technologiedemonstrator QuSAM

- Luftfahrt-Strukturkomponente
- Titan Ti-6Al-4V
- 1200 x 410 x 95 mm



HAP 3 – Vernetzung digitaler Zwillinge mit Fertigungsschritten und Realbauteilen

Das HAP 3 bildet die Verknüpfung der WAAM-Prozesssimulation und Zerspanungssimulation in eine durchgehende digitale Prozesskette.

AP 3.1 – Aufbau des digitalen Zwillings und Abgleich zur Fräsprozesssimulation

Dieses Arbeitspaket bildete die methodische Grundlage für die Optimierung der Frässtrategie und das Upscaling der Nachbearbeitung von WAAM-gefertigten Ti-6Al-4V-Komponenten. Ziel war die durchgängige Vernetzung der additiven Fertigung mit der spanenden Nachbearbeitung über digitale Modelle. Dazu wurde zunächst ein digitaler Fräsprozesszwilling aufgebaut, der die Geometrien der WAAM-Bauteile als Digitalisat übernimmt, die Eingriffsverhältnisse der Werkzeuge sowie die resultierenden Prozesskräfte entlang der Fräsbahnen berechnet und damit die Fräsplanung auf Basis realer Bauteilgeometrien ermöglicht. Als Ausgangsbasis für die Modellierung der Prozesskräfte dienten Erkenntnisse aus dem Vorgängerprojekt REGULUS sowie den Arbeitspaketen AP2.2, AP2.3 und AP4.2, wodurch eine konsistente Datenbasis über die gesamte Prozesskette gewährleistet wurde.

Ein zentraler Arbeitsschwerpunkt von HEGGEMANN war die systematische Gegenüberstellung der WAAM-Prozessparameter mit den geometrischen Abmessungen der gefertigten Körper. Dieser Abgleich erlaubte die Charakterisierung des Einflusses prozesseitiger Eingangsgrößen auf die Bauteilgeometrie und lieferte die Grundlage für die Fräsbahnplanung. Ergänzend wurden Materialviskosität, Oberflächenrauigkeit und -welligkeit analysiert, da diese Kenngrößen entscheidend für die Eingriffsverhältnisse beim Fräsen und die Genauigkeit der Prozesskraftberechnung im digitalen Zwilling sind. HEGGEMANN unterstützte die TUM durchgehend bei allen zentralen Arbeitsschritten, von der Konzeption des digitalen Fräsprozesszwillings über die Kopplung der WAAM- und Fräsprozesszwillinge bis hin zur Sicherstellung einer konsistenten Rückkopplung zwischen den Modellen. Dies ermöglichte, dass prozessbedingte Geometrieabweichungen aus der additiven Fertigung unmittelbar in der Fräsplanung berücksichtigt werden konnten. Darüber hinaus beteiligte sich HEGGEMANN aktiv an der Versuchsplanung, Validierung und gemeinsamen Auswertung, indem Herstellparameter und Eigenschaften der geschweißten Probenkörper bereitgestellt und Vergleichsproben zur direkten Gegenüberstellung der Simulationsergebnisse mit realen Bauteilen geliefert wurden.

Die im Arbeitspaket erarbeiteten Datensätze und Ergebnisse wurden abschließend für die Weiterverwendung in AP3.3 sowie zur Dokumentation und Weiterentwicklung in HAP4 bereitgestellt.

AP 3.4 – Validierung des digitalen Zwillings anhand endbearbeiteter Bauteile

Dieses Arbeitspaket diente der Validierung der in AP 3.1 und AP 3.2 entwickelten Grundlagen und Vorgehensweisen. Ziel war die Prüfung des digitalen Fräsprozesszwillings einschließlich der Optimierung der Frässtrategie unter Berücksichtigung von Werkzeugverschleiß. Die Ergebnisse bildeten die Basis für die anschließende Skalierbarkeitsanalyse in AP 3.5. Für HEGGEMANN stand die technische Integration der WAAM-Anlage in den digitalen Zwilling im Vordergrund, wozu die Entwicklung geeigneter digitaler Schnittstellen erforderlich war.

Inhaltlich erfolgte die Kopplung der thermo-mechanischen WAAM-Simulation mit den an der TU München erarbeiteten Fräsprozessmodellen. Als gemeinsame Datenbasis diente das HyperMILL-Format, das eine durchgängige Übergabe prozessrelevanter Informationen zwischen den Simulationen ermöglichte. Verzugsmodelle aus der thermo-mechanischen WAAM-Simulation wurden als CAD-Geometrien exportiert und in den digitalen Fräsprozesszwilling integriert. Die aus der Simulation abgeleiteten Vormodelle wurden der finalen CAD-Zielgeometrie gegenübergestellt, sodass prozessbedingte Abweichungen bereits in der Fräsplanung berücksichtigt werden konnten. Der validierte digitale Zwilling ermöglichte die effiziente Nachbearbeitung luftfahrtrelevanter Komponenten. Nach Abschluss der Schnittstellenentwicklung war die WAAM-Anlage in der Lage, die Daten des digitalen Zwillings vollständig zu verarbeiten. Die aufbereiteten Daten wurden zudem für die Dokumentation und Weiterverwendung in HAP 4 bereitgestellt.

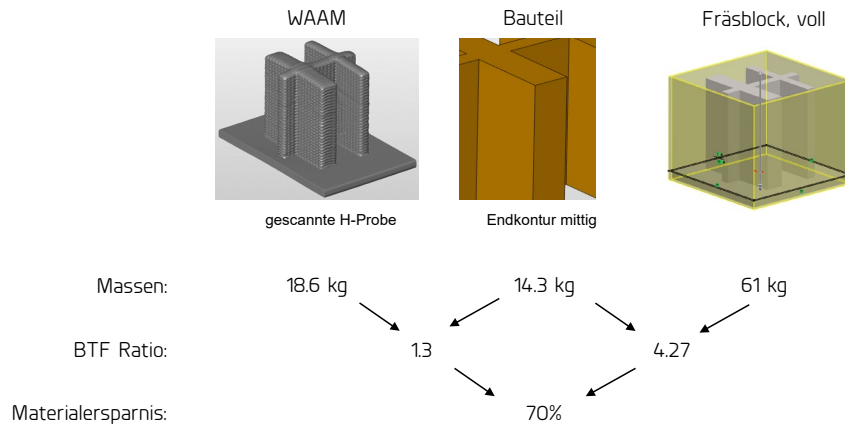
Diese Kopplung wurde auch im Workflow von AP 1.3 am Ende der Simulationskette dargestellt. Durch die Fähigkeit des digitalen WAAM-Zwillings, die tatsächliche Roboterbahn in eine Simulation zu übertragen und umgekehrt, können neben der Serienfertigung auch Reparaturen von Bauteilen abgebildet werden. Liegt ein Bauteilscan vor, lassen sich relative Verformungen zuverlässig bestimmen. Ergänzend testete HEGGEMANN im Rahmen dieses Arbeitspaketes in der Fertigungszelle die Verwendung von Nullpunkt-Spannsystemen zur Reduzierung der Rüstzeiten. Ein typischer Einfluss thermischer Nachbehandlungen, wie Spannungsarmglühen, kann jedoch die Positionierung beeinträchtigen, da der Bezug erneut eingemessen werden muss, wenn das Bauteil ab- und wieder aufgebaut wird

AP 3.5 – Bewertung der qualitätssicheren Skalierbarkeit, Homogenität des endkonturnah gefertigten Bauteils und des Effizienzsteigerungspotenzials

Ziel dieses Arbeitspakets war die umfassende Bewertung der qualitätssicheren Skalierbarkeit endkonturnaher WAAM-gefertigter Bauteile aus Ti-6Al-4V sowie die systematische Quantifizierung des Effizienzsteigerungspotenzials, das sich durch die digitale Vernetzung der Prozesskette und die anschließende Fräsnachbearbeitung erschließen lässt. Hierzu wurden skalierbare Geometrien und zugehörige Prozessparameter entwickelt, bewertet und in einer strukturierten Methode zur Effizienzbewertung auf die untersuchten Bauteile angewendet. HEGGEMANN war hierbei aktiv in die Nutzung der WAAM-Anlage eingebunden, und alle Arbeiten erfolgten in enger Abstimmung mit den Projektpartnern.

Die experimentellen Untersuchungen umfassten gestaffelte Versuche an Teilstrukturen unterschiedlicher Komplexität. Zunächst wurden einfache Wand- und Kreuzstrukturen als Basis zur Charakterisierung der Skalierbarkeit untersucht, bevor komplexere Demonstratorbauteile einbezogen wurden. Zusätzlich wurden Bauteile aus AP3.4 in die Bewertung integriert, um die Homogenität und qualitätssichere Skalierbarkeit über eine breitere Datenbasis zu prüfen. Diese Vorgehensweise bestätigte die Übertragbarkeit der entwickelten Parameter und Methoden auf realitätsnahe Bauteilgeometrien.

Ein zentraler Bestandteil der Effizienzbewertung war die Bestimmung der Buy-to-Fly-Ratio, also das Verhältnis des ursprünglich eingekauften Materials für ein bestimmtes Bauteil im Verhältnis zu seinem eigentlichen Bauteilgewicht, als Maß für die Materialausnutzung des WAAM-Prozesses im Vergleich zu konventionellen subtraktiven Fertigungsverfahren „aus dem Vollen“. Die folgende Abbildung verdeutlicht anschaulich am Beispiel einer H-Probe die deutlich höhere Materialeffizienz bei dem WAAM-Prozess im Vergleich zu dem klassischen Fräsen.



In einer projektbegleitenden Abschlussarbeit wurde bei HEGGEMANN zusätzlich ein Vergleich zwischen Schweißbaugruppen und WAAM-Bauteilen durchgeführt. Beispielsweise in Bezug auf die Buy-to-Fly Ratio lagen Schweißen und WAAM sehr nah beieinander. Eine intelligent in Blechbauweise konstruierte Struktur schlägt erst dann um, wenn die Wandbreiten dicker sind und Vollanschlüsse beim Schweißen sehr teuer werden. Anders herum sind Schweißbaugruppen, wenn die Wandhöhe zu groß wird im Vorteil, weil die Zeit des Vollanschlusses der Lagenhöhe gegenläufig ist. Bei frästechnisch anspruchsvollen Werkstoffen wie z.B. auch hochfesten Titan-legierungen ist das Verhältnis von Fräsbearbeitung zum additiven Schweißen besonders hoch. Daher war es im Projekt sehr sinnvoll das überschüssige Wandaufmaß zu reduzieren und bestätigte die Sinnhaftigkeit der Simulation des Verzuges und deren Kompensation aus HAP 2 als Vorbereitung für HAP3.

Nachfolgend Auszüge aus der Abschlussarbeit, wobei die Bewertung der unterschiedlichen Verfahren anhand der in der Abbildung links dargestellten Mustergeometrie vorgenommen wurde.

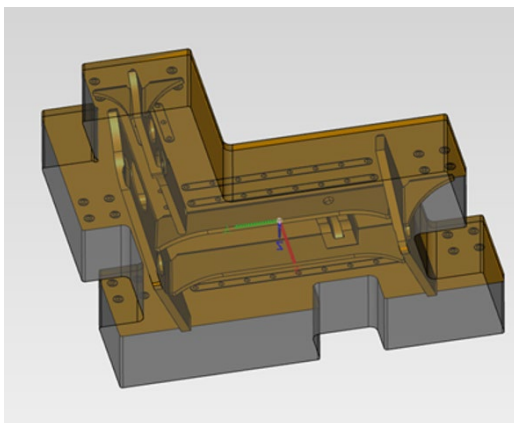


Tabelle 5: Kennwerte für die Fräsbearbeitung der ausgewählten Werkstoffe

Kennwerte	Stahl S355J2+N	Titan 6Al-4V	Alloy 625
Fräszeiten [h]	85	663	941
Werkzeugkosten auf Fräszeit [€]	200	1800	3340
Ressourcenstundensatz [€/h]	110	110	110
Kosten [€]	9550	74730	106850

Tabelle 9: Vergleich der BTF ratio für die betrachteten Prozesse

Herstellungsverfahren	Fräsbearbeitung	Schweißbaugruppe	WAAM
BTF ratio	7,1	1,5	1,3
BTF ratio [%]*	0,14	0,66	0,79

*vom Rohmaterial übrig gebliebene Masse in Prozent

Quelle: P. Buchmann: Bewertung der ökonomischen und ökologischen Nachhaltigkeit des Wire Arc Additive Manufacturing für die Luft- und Raumfahrttechnik, Bachelorarbeit, Hochschule Hamm-Lippstadt, 2022

Die Buy-to-Fly-Ratio wurde sowohl manuell auf Basis realer 3D-Geometrien als auch mithilfe der simulationsgestützten Prozessplanung im digitalen Zwilling bestimmt, um den Mehrwert der digitalen Prozesskette gegenüber einer rein empirischen Vorgehensweise zu quantifizieren.

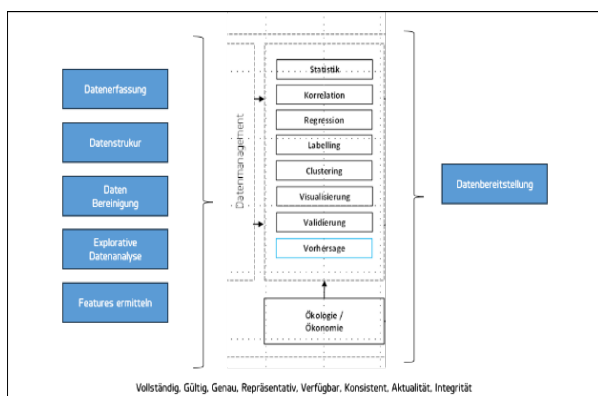
Während die konventionelle Ermittlung auf der manuellen Auswertung realer Geometrien und damit auf zeitaufwändigen Berechnungsschritten beruhte, ermöglichte der digitale Zwilling eine automatisierte Bestimmung der Kennzahl direkt aus den Simulations- und Prozessdaten. Die erzielten Ergebnisse zeigten eine sehr gute Übereinstimmung mit den manuell ermittelten Referenzwerten, konnten jedoch mit deutlich reduziertem Zeitaufwand generiert werden. Auf Grundlage dieser Ergebnisse wurde gemeinsam mit den Projektpartnern eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung durchgeführt, in der das durch die digitale Vernetzung der Prozesskette und die optimierte Fräsnachbearbeitung erschließbare Effizienzsteigerungspotenzial bewertet wurde. In Verbindung mit den in HAP 1 erzielten Verbesserungen der Herstellzeit durch optimierte Kühlstrategien (bis zu 300 % Effizienzsteigerung) sowie den im Projekt erreichten Reduzierungen des Wandaufmaßes und der durchschnittlichen Zerspanzeiten bei Titanbauteilen konnte gezeigt werden, dass die technologischen Zielsetzungen des Projekts hinsichtlich Material- und Zeiteffizienz übertroffen wurden.

Darüber hinaus eröffnet der digitale Zwilling eine zusätzliche Verwertungsperspektive: Durch die thermische Vorbetrachtung der Wärmeentwicklung und der resultierenden Abkühlgradienten lassen sich Effizienzkennzahlen wie die Buy-to-Fly-Ratio bereits in frühen Planungsphasen belastbar prognostizieren. Eine derartige vorausschauende Bewertung wäre ohne die simulationsgestützte Abbildung des Prozesses im digitalen Zwilling nicht in vergleichbarer Geschwindigkeit und Aussagekraft möglich.

Neben physikalischen Prozessdaten erfasst die Stromquelle auch redaktionelle Metadaten wie Bauteil-, Serien- und Rückmeldenummern sowie Layer- und Sektionskennungen. Diese Informationen dienen insbesondere der Rückverfolgbarkeit von Bauteilen gemäß luftfahrttechnischen Qualitätsanforderungen und ermöglichen gleichzeitig eine strukturierte Filterung und Auswertung der Prozessdaten im Rahmen statistischer Prozesskontrollen.

Für die Datenspeicherung wurde zunächst die im Vorgängerprojekt REGULUS etablierte InfluxDB weiterverwendet. Im Projektverlauf erfolgte jedoch eine Migration auf eine PostgreSQL-Datenbank, um eine einheitlichere und flexiblere digitale Infrastruktur zu schaffen. Durch die Erweiterung TimescaleDB können zeitbasierte Prozessdaten effizient verwaltet werden, während gleichzeitig relationale Datenstrukturen sowie Binärformate (z. B. Bild-, Audio- oder Videodaten) integriert werden können. Diese Datenbasis bildet damit eine skalierbare Grundlage für weiterführende Analyse- und Simulationsanwendungen innerhalb der digitalen Prozesskette. Die im Projekt erarbeitete Datenarchitektur stellt somit eine wesentliche Voraussetzung für die horizontale Integration der Prozessdaten sowie für die Kopplung der realen Fertigung mit dem digitalen Zwilling dar. Nach Projektende wurde die Infrastruktur weiter ausgebaut und auf ein neues Monitoring-Framework (MonitorCX als Nachfolger von FactoryCX) migriert. Zudem wurden zusätzliche Messpunkte, unter anderem zur Erfassung elektrischer Leistungsdaten, integriert, um perspektivisch auch Nachhaltigkeits- und Energieeffizienzanalysen zu unterstützen.

Aus dem Arbeitspaket wurde gemeinsam mit den Partnern auf Basis des Workflows die nachfolgend dargestellte Bewertungsstruktur für die erfassten Daten abgeleitet, welche dann auch für alle weiteren Parameter und qualitätsrelevanten Themen rund um den WAAM-Prozess herangezogen wurde.

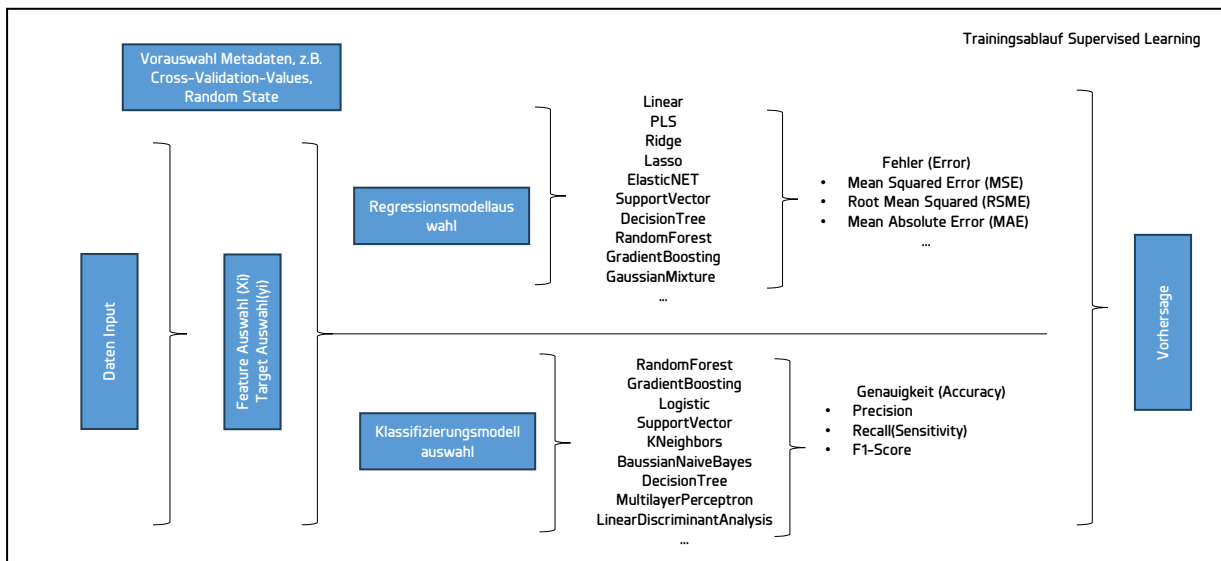


- **Vollständig (Complete):** Beschreibt, ob alle notwendigen Datenfelder für einen Datensatz vorhanden sind. Fehlende Werte können zu ungenauen Analysen und falschen Entscheidungen führen.
- **Gültig (Valid):** Bezieht sich darauf, ob die Daten den erwarteten Formaten und Regeln entsprechen. Zum Beispiel muss ein Datum im richtigen Format vorliegen oder eine E-Mail-Adresse gültig sein.
- **Genau (Accurate):** Beschreibt, wie nah die Daten an der Realität liegen. Fehlerhafte Eingaben oder Messungen können zu Ungenauigkeiten führen.
- **Repräsentativ (Representative):** Bedeutet, dass die Daten die Gesamtpopulation korrekt widerspiegeln und keine systematischen Verzerrungen aufweisen.
- **Verfügbar (Available):** Bezieht sich darauf, ob die Daten für diejenigen zugänglich sind, die sie benötigen, wann immer sie benötigt werden.
- **Konsistent (Consistent):** Beschreibt, ob die Daten über verschiedene Systeme und Zeiträume hinweg einheitlich dargestellt werden.
- **Aktualität (Timeliness):** Bezieht sich darauf, wie aktuell die Daten sind und ob sie für den jeweiligen Zweck noch relevant sind.
- **Integrität (Integrity):** Stellt sicher, dass die Daten korrekt gespeichert und nicht manipuliert wurden.

AP 4.2 – Auswahl KI-Strategien und Definition Inputgrößen und Schnittstellen für digitale Prozesskette

In diesem Arbeitspaket wurden ausgehend von den KI-Strategien in HAP 1 und denen sich aufgrund der technischen Einführung von GPT KI Modellen nach 2022 möglichen weiteren Datennutzungen verschiedene Entscheidungsprozesse der Infrastruktur entwickelt und hergeleitet. Wie bereits in AP 2.1 in der Workflowabbildung zu sehen war, wurden neben der Datenerfassung, auch Datenverarbeitung, Datenmanagement (Transformation, Speicherung uvm.) und Weiterverarbeitung in anderen Applikationen forciert. Mit Hilfe eines Edge-PCs wurden die aufgezeichneten Daten zunächst geclustert, um statistisch zusammenhängende Daten auswerten zu können. Aus diesen folgten dann Berichte sowie die Ableitung von Qualitätsvergleichen mit bereits existenten Datensätzen. Hier erfolgt auch die Vorbereitung von KI-Methoden, wie das Labeling von Outputgrößen für Regressions- und Klassifizierungsaufgaben (Supervised Learning). Dieses Labeling wurde dann u.a. als sogenannte Eingriffsgrenzenüberwachung bei HEGGEMANN im Grafana Dashboard zur Prozessüberwachung implementiert verwendet.

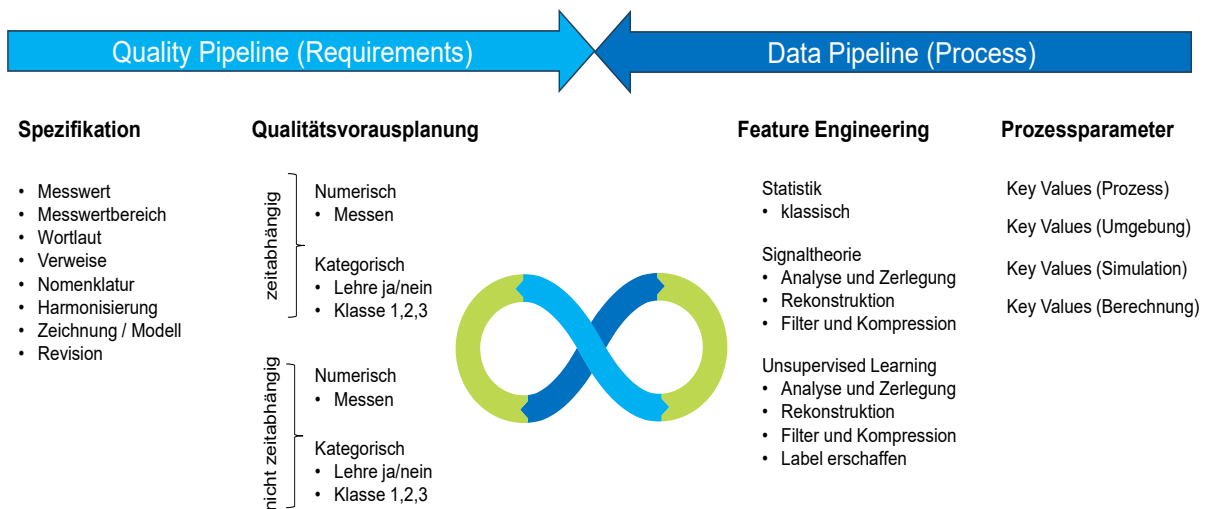
Dabei hat HEGGEMANN mit schweiß- und luftfahrttechnischer Expertise wesentlichen inhaltlichen Input zur Qualitätsabsicherung von WAAM- Bauteilen geliefert und die Projektpartner bei der sinnhaften Auswertung von Schweißdaten unterstützt. Für alle klassischen KI-Anwendungen außerhalb von neuronalen Netzen oder Transformer-Architekturen wurden dann folgende Auswertungsprinzipien festgelegt:



AP 4.3 Validierung digitale Prozesskette und Definition Prozessfenster für qualitätssichere Skalierbarkeit und Bauteilhomogenität

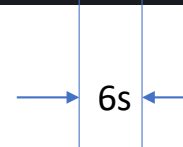
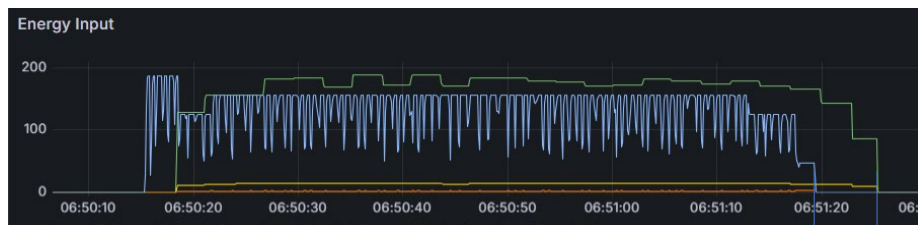
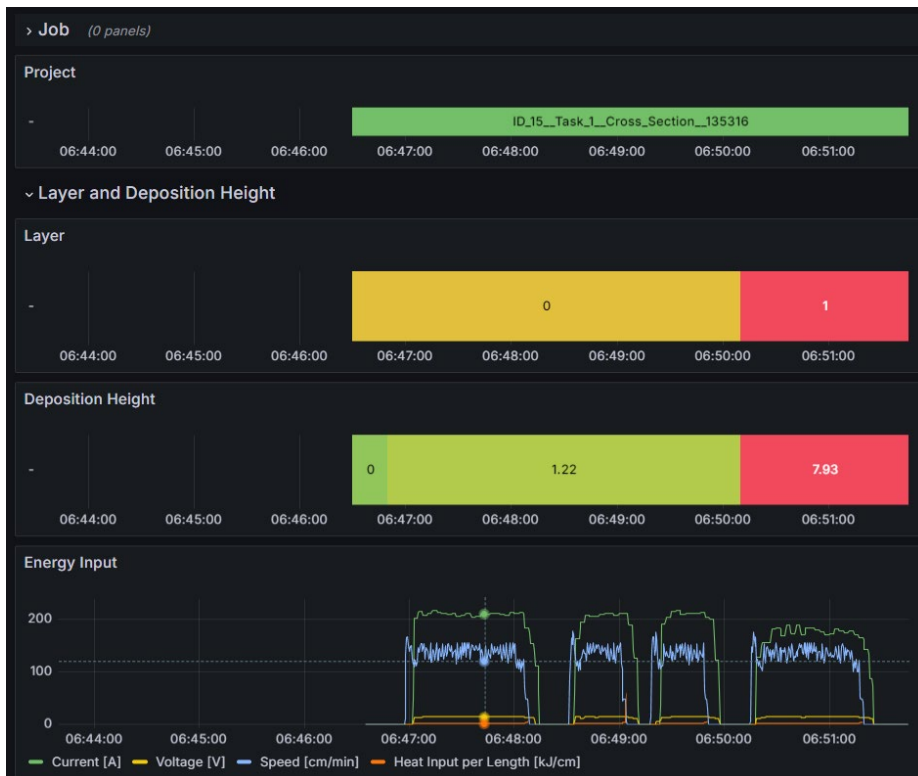
Ziel von AP 4.3 war die Validierung der in AP 4.1 und AP 4.2 entwickelten digitalen Prozesskette im Hinblick auf eine qualitätssichere Fertigung von WAAM-Bauteilen bei variierenden Geometrien. Hierzu wurden Prozessfenster definiert und in der HEGGEMANN WAAM-Anlage experimentell überprüft. Ein zentraler Arbeitsschwerpunkt lag dabei auf der Festlegung geeigneter Qualitätskriterien. Dabei wurden aufgezeichnete Prozessparameter hinsichtlich ihrer Relevanz für die Qualitätssicherung bewertet und mit den einschlägigen luftfahrttechnischen Normen abgeglichen. Aus dieser Analyse wurden sogenannte Key Values abgeleitet – zentrale Prozesskennwerte, die die Fertigungsqualität von Ti-6Al-4V-Strukturen charakterisieren und als Hauptindikatoren in der digitalen Prozesskette verankert wurden. Ein weiterer wichtiger Aspekt war die Transformation von Sensordaten in qualitätsrelevante Merkmale. Im Prozess ermittelte Rohdaten liegen allgemein betrachtet nicht immer direkt in einer Form vor, die eine Bewertung der Bauteilqualität erlaubt. Analog zu Feature-Engineering im Machine Learning wurden daher die Rohdaten aufbereitet und zwischen den Key Values und den zugrunde liegenden Datentypen, Speicherhäufigkeiten und Fehlergrößen vermittelt, um eine konsistente Interpretation innerhalb der digitalen Prozesskette zu ermöglichen.

Durch diese methodische Verknüpfung von technischen Sensorwerten mit qualitätsbezogenen Kennzahlen konnte die Prozesskette systematisch validiert und robuste Prozessfenster für eine skalierbare, homogene Bauteilproduktion etabliert werden. Das prinzipielle Vorgehen ist in der folgenden Abbildung veranschaulicht



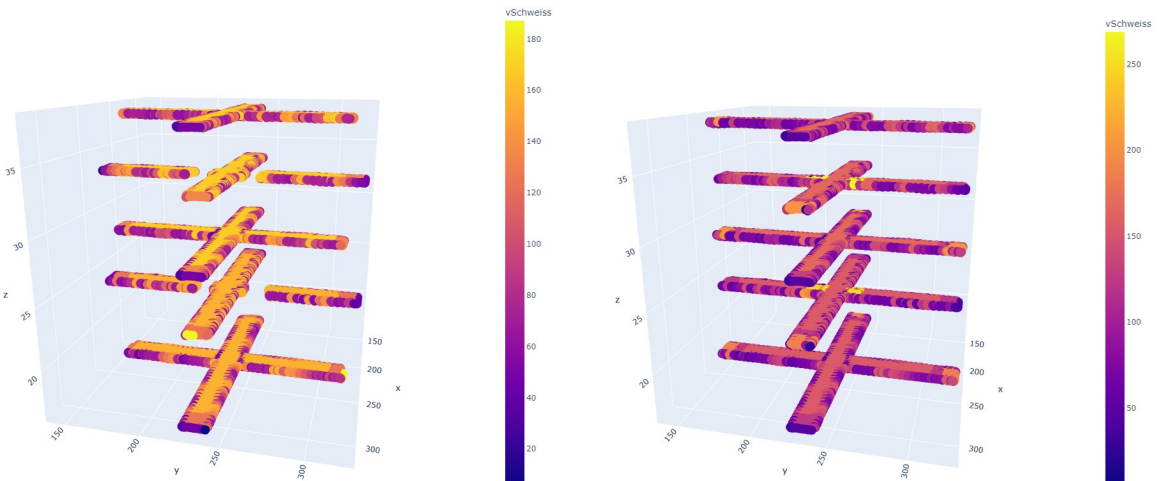
Obwohl die Prozessqualität theoretisch als kontinuierliche Größe betrachtet werden kann, liegen die im Rahmen der Digitalisierung erfassten Daten diskret vor, abhängig von der gewählten Abtastrate, und sind daher nur zu bestimmten Zeitpunkten als Wertepaare verfügbar. Für die Beurteilung und Validierung der digitalen Prozesskette mussten daher zeitliche Verschiebungen zwischen den einzelnen Datensätzen berücksichtigt werden. Aufgrund der hohen Datenmengen erfolgt die Weiterverarbeitung in der Regel statistisch, wobei sich die Vorgehensweise nach den Grundsätzen der Statistischen Prozesskontrolle (SPC) nicht wesentlich von konventionellen Methoden unterscheidet. Die exakte Verarbeitung der Daten, einschließlich der Behandlung von Nullniveaus, wurde bereits in AP 1.4 dokumentiert.

Nach der Integration aller Hardwarekomponenten wurde jedoch ein zeitliches Driften festgestellt, da nicht alle Parameter im Gateway der Verlinked-Infrastruktur denselben Zeitstempel erhielten. Eine präzise Synchronisation der Zeitauflösung erwies sich als notwendig und konnte im Projekt am zuverlässigsten durch Vergleich korrespondierender Größen aus zwei Datenquellen erreicht werden. Hierbei wurden primär die Stromquelle und die Robotersteuerung genutzt: Die Stromquelle liefert kontinuierlich Messgrößen wie Strom, Spannung und Drahtvorschub, während die Robotersteuerung X-, Y- und Z-Koordinaten sowie die Schweißgeschwindigkeit bereitstellt. Durch diese Vorgehensweise konnte eine konsistente zeitliche Zuordnung aller Prozessdaten sichergestellt werden, was eine valide Analyse und Bewertung der Prozesskette unter Berücksichtigung von Abtastrate und Messlatenz ermöglichte. Die folgende obere Grafik zeigt dies exemplarisch. Die untere Grafik zeigt zudem die zeitlich geschiftete Auswertung des Energieeintrags, was ebenfalls für eine energieintensive Prozessroute von großem Interesse ist, da entsprechende Materialeigenschaften über die eingebrachte Energie verändert werden.

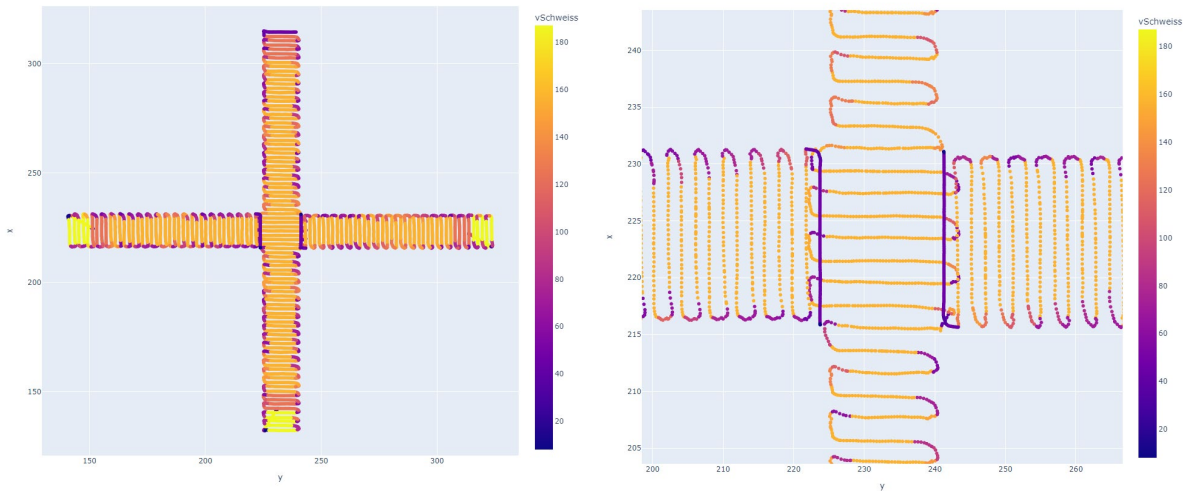


Die Shiftkorrektur wurde durch die technische Angleichung aller Hardwarekomponenten innerhalb eines gemeinsamen Netzwerks realisiert. Hierzu wurden die Abtastraten präzise reguliert, sodass nur die für die jeweilige Fehlergröße notwendigen Daten erfasst wurden, Engpässe im Gateway vermieden und die Hardwarekapazitäten optimal genutzt werden konnten. Zusätzlich wurde eine zeitliche Synchronisation über die Netzwerkzeit (NTP) durchgeführt, um die Komponenten auf eine gemeinsame Zeitbasis zu bringen. Für bereits aufgezeichnete Daten wurde die Shiftkorrektur abhängig von der Datenmenge mittels Pandas (Python) oder Polars (Rust-basiertes Framework) umgesetzt. Dabei wurde zunächst die erforderliche Zeitverschiebung bestimmt, anschließend die Anzahl der betroffenen Abtastpunkte ermittelt und schließlich eine Zeilenverschiebung der Stromquellenwerte (ausgewählte Spalten) relativ zu den Robotersteuerungswerten durchgeführt.

Die nachfolgende Abbildung verdeutlicht mit Grafik auf der linken Seite die Auswirkungen der ursprünglichen Zeitversetzung und rechts die korrigierten Daten nach einer entsprechenden Anpassung. Durch diese Maßnahme konnte eine konsistente zeitliche Korrelation der Messgrößen hergestellt werden, die eine valide Analyse und Integration der Prozessdaten in die digitale Prozesskette ermöglicht.



Die Validierung der Shiftkorrektur erfolgte zusätzlich durch Überprüfung der örtlichen Auflösung der X-, Y- und Z-Koordinaten. Ein initialer Zeitdrift war bereits im Dashboard erkennbar, da Start- und Endrampen von Bahnen nicht korrekt dargestellt wurden (links: gelbe Bereiche). Die Detailansicht auf der rechten Seite der nachfolgenden Abbildung ermöglichte eine exakte Korrektur der Datenverschiebung und Anpassung an die tatsächlichen Programmierwerte, beispielsweise bei Überlappungen an Kreuzungsstößen.

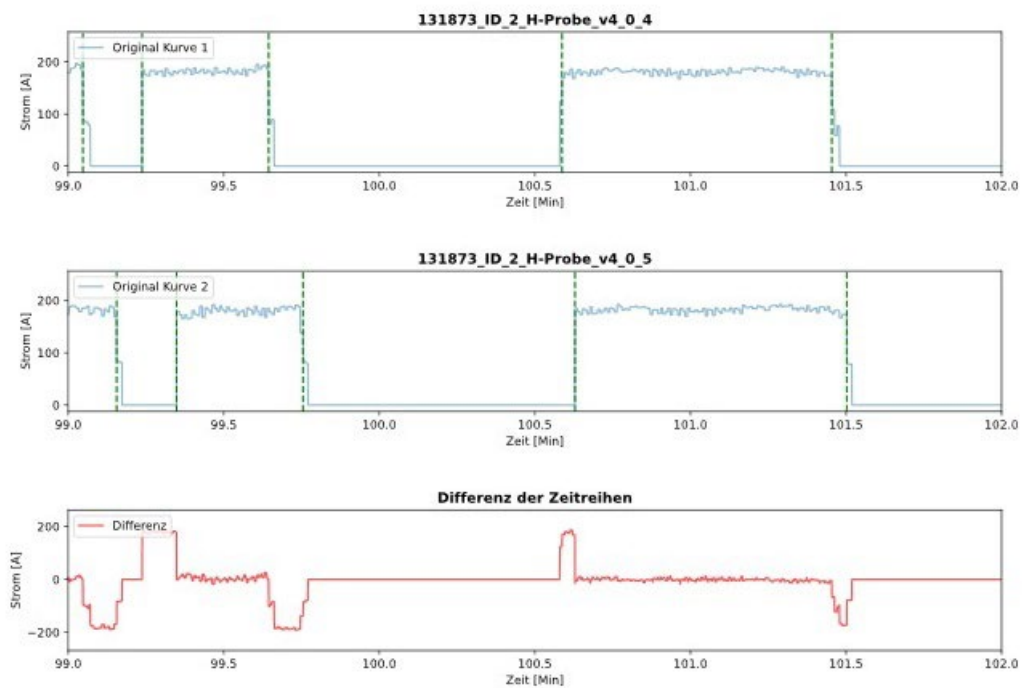


Die Implementierung der Shiftkorrektur bot zudem die Möglichkeit, Tools und Workflows für das datenbasierte Prozesshandling zu etablieren. Insbesondere zeigte sich, dass Plausibilitätskontrollen bereits auf Dashboard-Ebene notwendig sind, da sich Datenkorrekturen mit zunehmendem zeitlichem Abstand zum Ereignis signifikant erschweren. Im Anschluss wurden experimentelle Sensitivitätsanalysen der erfassten Parameter hinsichtlich prozessbedingter Unregelmäßigkeiten durchgeführt. Die Korrelation zwischen Prozessparametern und Qualitätskriterien wurde anhand von Bauteilvergleichen untersucht. Hierbei erfolgte die Bewertung durch den Abgleich von Dashboard-Anzeigen (Grafana) mit den Ergebnissen aus Röntgenprüfungen, Schliffbildanalysen und der visuellen Außeninspektion. Zur Bewältigung der anfallenden Datenmengen wurden entsprechende Rechenressourcen bereitgestellt und in die Prozesskette integriert.

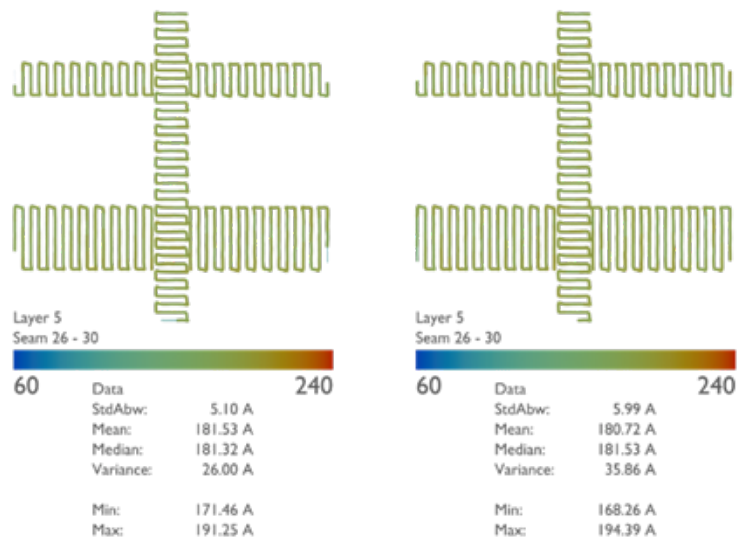
Die aus dieser Validierung abgeleiteten Grenzen für eine qualitätssichere Skalierbarkeit wurden in AP 4.3 definiert und flossen in den Meilenstein MS3 ein, sodass die Basis für die anschließende Prozessoptimierung und Nachverfolgbarkeit gelegt wurde.

AP 4.4 Datenanalyse, -komprimierung und -sicherung, Dokumentation, Wissensverwertung

Aufbauend auf AP 4.1 wurde im Rahmen des Arbeitspaketes AP 4.4 eine Datenanalyse für mehrere Bauteile erstellt und verglichen. Es zeigte sich, dass die wichtigsten qualitätsrelevanten Schweißdaten (Strom, Spannung, Leistung, Schweißgeschwindigkeit, Drahtvorschub) eine Abweichung jeweils kleiner 5% haben. Das entspricht der Toleranz von Kalibrierungen entlang der Prozesskette, beispielsweise von Stromquellen oder Roboterbewegungen und ist ein sehr gutes Ergebnis mit Blick auf die industrielle Verwertbarkeit der Projektergebnisse. Die folgende Abbildung zeigt zunächst den Vergleich der zeitlichen Zusammenhänge bzw. die Abweichungen im WAAM-Prozess eines Serienbauteils im Vergleich zu einem qualifizierten Bauteil.



In der nächsten Abbildung sind die räumlichen Zusammenhänge eines Layers für ein Serienbauteil im Vergleich zu einem qualifizierten Bauteil exemplarisch gegenübergestellt.

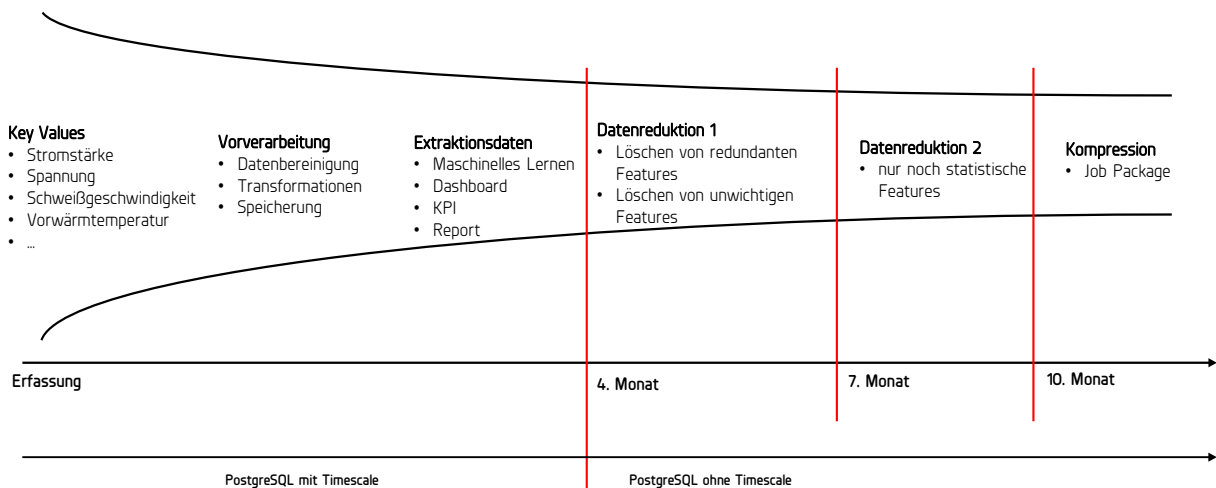


Für das Qualifizierungsbauteil werden zunächst alle relevanten Prozessparameter für den Druckauftrag ermittelt. Anschließend werden Parameterfenster auf Basis statistischer Prozesskontrolle sowie Fehler- und Sensitivitätsanalysen bestimmt und mit den Kalibrierfenstern der Komponenten sowie den zulässigen Kriterien der jeweiligen Qualitätsnormen (z. B. Kundenspezifikationen) abgeglichen, um eine Entscheidung i.O./n.i.O. zu treffen.

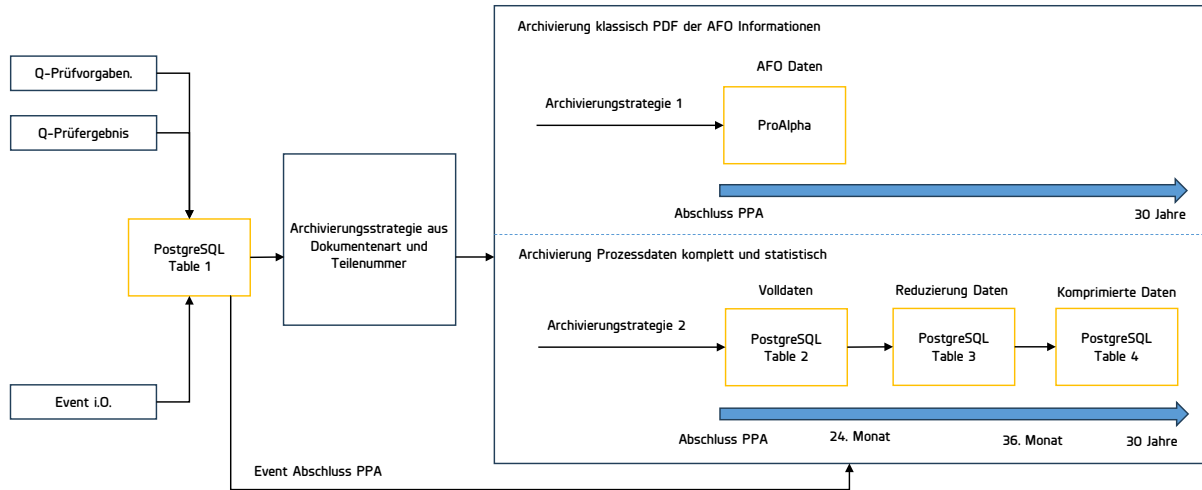
Diese Vorgehensweise hat sich als zielführend erwiesen. Bei kurzzeitig größeren Abweichungen der Mittelwerte sollte der modale Mittelwert stets berücksichtigt werden, um die Bewertung dieser Ausreißer zu relativieren. Für die statistische Auswertung kamen klassische und robuste Verfahren zum Einsatz, darunter Grubbs-Test, Dixon-Test (Q-Test), Median Absolute Deviation (MAD) zur robusten Abschätzung der Streuung sowie der Z-Score zur Erfassung der Standardabweichungen vom Mittelwert. Zusätzlich wurde die IQR-Methode (Interquartilsabstand) verwendet, bei der alle Stromwerte einer Naht aufsteigend sortiert und Werte unterhalb von Q1 bzw. oberhalb von Q3 als Ausreißer klassifiziert werden. In der Abbildung rechts zeigt der linke Bereich, dass der Mean (Mittelwert) von 181,53 A und der Median von 181,32 A eine relativ symmetrische Verteilung anzeigen. Rechts sind die Differenzen größer; niedrige Werte aus Start- oder Stoppphase beeinflussen den Mittelwert, die IQR-Methode identifiziert diese Werte zuverlässig.

Für weiterführende Analysen wurden fortgeschrittene Methoden der künstlichen Intelligenz eingesetzt, wie DBSCAN oder LOF (Local Outlier Factor), um räumliche Anomalien oder fehlende Datenpunkte zu erkennen. Darüber hinaus wurden Konzepte für Qualitätsvorausplanung, Datenkomprimierung und Dokumentation entwickelt und getestet. Die Validierung erfolgt über eine digitale Laufkarte, die bei HEGGEMANN für den WAAM-Prozess bereits implementiert ist. Das integrierte Qualitätstool QS1234 wurde mit Prüfplänen gemäß Spezifikation oder Prozess-FMEA verknüpft, sodass für jeden Arbeitsschritt nachvollziehbar ist, welche Prüfungen, Prüfmittel und welches Personal einzusetzen sind und ob alle Prüfmittel kalibriert sind. Die Berichterstellung, Archivierung und Nachverfolgbarkeit werden über die Datenbankarchitektur der PostgreSQL umgesetzt.

Gemäß der nachfolgenden Abbildung legt HEGGEMANN, abhängig von den Kundenanforderungen, aus der Verfahrensweisung die Archivierungsstrategie für jedes Datenformat fest. Auf Teilenummernebene wird im ERP-System die zugehörige Archivierungsnummer (Template) hinterlegt. Bei Auftragseinstellung erfolgt die lenkende Steuerung der Daten gemäß Template. Technisch wird dies über verschiedene Tabellen umgesetzt, wobei die meisten Datenoperationen über PostgreSQL-Befehle automatisiert werden.



Die Datensicherung erfolgt redundant, um die Integrität und Verfügbarkeit der Qualitätsdaten sicherzustellen. Hierzu sind nochmal zwei im Rahmen des Projekts erarbeitete Szenarien abgebildet:



Zusammenfassend konnten im Rahmen von AP 4.1 erfolgreiche Ansätze zur Analyse, Komprimierung und sicheren Speicherung der umfangreichen WAAM-Prozessdaten entwickelt und anhand realer Prozessdatensätze validiert werden. Diese Ergebnisse schaffen die Grundlage für eine nachhaltige Nutzung und Verwertung der gewonnenen Erkenntnisse und unterstützen die industrielle Anwendung des WAAM-Prozesses zur effizienten Fertigung von Luftfahrtkomponenten in hoher Qualität.

7. Zusammenfassung der Projektergebnisse

Im Rahmen des Projekts wurde mit Blick auf die Ziele dieses Innovationsvorhabens eine durchgängige digitale Prozesskette für die additive Fertigung von Ti-6Al-4V-Strukturen mittels Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) mit anschließender Fräsnachbearbeitung erfolgreich im Projektverbund entwickelt, implementiert und hinsichtlich Skalierbarkeit, Bauteilhomogenität und Qualitätssicherung systematisch bewertet.

Im Projekt übernahm HEGGEMANN eine zentrale Rolle bei der Entwicklung und Implementierung optimierter Bahnplanungsstrategien, die sowohl geometrische Anforderungen (Lagenhöhe, Wanddicke, Startpunktstrategie) als auch das thermische Management der WAAM-Prozesse berücksichtigten. Aufbauend auf spezifischen Schweiß-ZTU-Betrachtungen konnten definierte Gefügefenster gezielt angesteuert und durch eine präzise Steuerung der Abkühlverläufe sowie angepasste Kühlstrategien reproduzierbar erreicht werden. Die Validierung der Prozesse erfolgte durch den Partner FAU direkt an den von HEGGEMANN gefertigten Probenkörpern und Bauteilen anhand mikro- und makrostruktureller sowie mechanischer Zielgrößen, wodurch praxisrelevante Rückschlüsse auf die Prozessstabilität gezogen werden konnten.

Parallel unterstützte HEGGEMANN die Weiterentwicklung des digitalen Fräsprozesszwilling bei dem Partner TUM. Durch die Kopplung mit dem WAAM-Prozesszwilling flossen Verzugsmodelle aus der thermo-mechanischen Simulation direkt in die Frässtrategie ein, wodurch abweichungsarme und planbare Nachbearbeitungsschritte realisiert werden konnten. Die Ergebnisse zeigten eine signifikante Reduzierung von Bearbeitungsabweichungen und eine verbesserte Reproduzierbarkeit der Bauteilgeometrien. Die Robustheit und qualitätssichere Skalierbarkeit der gesamten Prozesskette wurde durch systematische Bauteilvergleichsuntersuchungen an HEGGEMANN-Komponenten validiert. Dabei wurden aufgezeichnete Prozessparameter mit luftfahrttechnischen Qualitätsnormen abgeglichen und über Röntgen-, Schlibbild- sowie Sichtprüfungen verifiziert. Parallel erstellte HEGGEMANN eine Wirtschaftlichkeitsanalyse auf Basis der Buy-to-Fly-Ratio und der Materialeffizienz, die das Effizienzsteigerungspotenzial der digitalisierten Prozesskette im Vergleich zu konventionellen Fertigungsverfahren quantifizierte und praxisnah belegte.

Abschließend erschloss HEGGEMANN Automatisierungspotenziale durch die Implementierung eines durchgängigen, skriptbasierten Workflows vom CAD-Modell bis zur fertigen Bahnplanung. Die Parametervorauswahl erfolgt hierbei auf Basis von KI-gestützten Klassifikationsmodellen, trainiert mit den während des Projekts generierten Prozessdaten, und ermöglicht so eine weitgehend bedienerunabhängige, reproduzierbare Prozessauslegung. Grundlage dieser Arbeiten bildete die umfassende digitale Infrastruktur von HEGGEMANN, die Datenerfassung, Speicherung, Analyse und Rückkopplung in den Fertigungsprozess vollständig integriert und damit eine praxisgerechte Umsetzung der Verbundprojektziele sicherstellte.

Insgesamt zeigt das Verbundprojekt, dass durch die integrierte Kombination aus additiver Fertigung, digitaler Prozesssimulation, KI-gestützter Prozessplanung und Nachbearbeitung nicht nur die technologischen Verbundziele erreicht, sondern auch die wirtschaftliche und qualitative Leistungsfähigkeit der Prozesskette insbesondere für größere WAAM-Bauteile erheblich gesteigert werden konnte. Die Ergebnisse bilden die Basis für kommerzielle Anwendungen in der industriellen Fertigung von Luftfahrtkomponenten und liefern zugleich wertvolle Erkenntnisse für zukünftige Entwicklungen im Bereich des digitalisierten Additive Manufacturing.

8. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Über die gesamte Projektlaufzeit von 42 Monaten waren zur Erreichung der Projektziele insbesondere umfangreiche Personalressourcen erforderlich. Entsprechend stellt die Kostenposition Personal (Position 837) mit rund 71 % der Gesamtaufwendungen den mit Abstand größten Anteil dar. Dies verdeutlicht die zentrale Rolle der industriell ausgerichteten Forschungs- und Entwicklungsarbeiten im Projekt QuSAM. Materialkosten (Position 813) machten etwa 4 % der Gesamtaufwendungen aus. In vergleichbarer Größenordnung lagen die Kosten für externe F&E-Fremdleistungen (Position 823) mit rund 5 %. Diese Aufwendungen entstanden insbesondere für spezialisierte Softwareentwicklungsleistungen im Zusammenhang mit der digital-basierten Prozessüberwachung und Qualitätsabsicherung sowie für die Entwicklung von Methoden zur Erstellung von Materialkarten für die Prozesssimulation.

Für sonstige unmittelbare Vorhabenkosten (Position 850) wurden rund 4 % der Gesamtaufwendungen eingesetzt. Innerbetriebliche Leistungen (Position 856) machten etwa 4 % aus und dienten vor allem der Nutzung interner Infrastruktur sowie ergänzender betrieblicher Ressourcen für praktische Versuche im industriellen Reallabor bei HEGGEMANN.

Mit etwa 2 % entfiel auf die Reisekosten (Position 838) ein vergleichsweise kleiner Anteil der Gesamtaufwendungen. Die Aufwende entstanden überwiegend im Zusammenhang mit Projekttreffen, Abstimmungen im Projektverbund sowie bilateralen Arbeitstreffen. Weitere projektbezogene Kosten (Position 847) lagen bei rund 1 %. Für Position 848 wurden im Projektverlauf keine Mittel in Anspruch genommen. Die allgemeinen Verwaltungskosten (Position 860) betrugen etwa 11 % der Gesamtaufwendungen und spiegeln die projektbezogenen indirekten Aufwände innerhalb der Organisation wider.

Insgesamt lagen die im Teilprojekt angefallenen zuwendungsfähigen Kosten nur geringfügig über den ursprünglich bewilligten Gesamtkosten. Die Abweichung bewegte sich im niedrigen einstelligen Prozentbereich und lag damit im Rahmen der üblichen projektspezifischen Schwankungen. Sämtliche Mittel wurden zielgerichtet für die Durchführung der wissenschaftlich-technischen Arbeiten eingesetzt und unterstützten maßgeblich die erfolgreiche Bearbeitung der Projektinhalte sowie die Erreichung der Ziele im Rahmen des Luftfahrtforschungsprogramms.

9. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die im Projekt erbrachten Leistungen waren von zentraler Bedeutung, um additive Fertigungsverfahren für großdimensionierte Titanstrukturen im Luftfahrtkontext von der Grundlagenforschung in Richtung industrieller Anwendbarkeit weiterzuentwickeln. Die Bearbeitung der komplexen, interdisziplinären Fragestellungen erforderte umfangreiche experimentelle Untersuchungen, Simulationsarbeiten sowie eine enge Verzahnung von Industrie und wissenschaftlichen Partnern. Ohne die öffentliche Förderung wäre eine Bearbeitung dieser Themen in der erforderlichen Tiefe nicht möglich gewesen, da die Entwicklung eines skalierbaren, qualitätsgesicherten und digital vernetzten WAAM-Prozesses erhebliche Vorleistungen in Forschung und Entwicklung voraussetzt.

Im Projektverlauf konnte HEGGEMANN luftfahrtspezifische Qualifizierungs- und Qualitätsanforderungen systematisch in den WAAM-Prozess integrieren und dieses Know-how aktiv in den Projektverbund einbringen. Gleichzeitig wurden durch die Arbeiten an Simulation, digitaler Prozesskette sowie technischen, wirtschaftlichen und ökologischen Bewertungsmethoden wesentliche Grundlagen geschaffen, um das Wire Arc Additive Manufacturing künftig als eigenständiges technologisches Kompetenzfeld im Unternehmen weiterzuentwickeln und erste Dienstleistungen, beispielsweise im Bereich Simulation und Prototypenfertigung, anzubieten. Die im Projekt erarbeitete Expertise bildet darüber hinaus die Grundlage für aktuell initiierte Kooperationen mit industriellen Partnern sowie für eine geplante Markteinführung entsprechender Technologien und Dienstleistungen ab 2027. Die Ergebnisse tragen der hohen Komplexität des Zusammenspiels von additiven Fertigungsverfahren, der Simulation der gesamten Prozesskette und einer spanender Nachbearbeitung Rechnung und ermöglichen einen strukturierten Wissenstransfer zwischen universitären, institutionellen und industriellen Partnern, der nun in konkrete Verwertungsaktivitäten in einem industriellen Umfeld überführt wird.

Damit leistet das Vorhaben einen direkten Beitrag zu den Zielen des Luftfahrtforschungsprogramms, insbesondere zur Stärkung der technologischen Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Luftfahrtindustrie, zur Etablierung innovativer und ressourceneffizienter Fertigungsverfahren sowie zur Beschleunigung des Transfers wissenschaftlicher Erkenntnisse in industrielle Anwendungen am Standort Deutschland.

10. Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere bzgl. Verwertbarkeit der Ergebnisse

Im Projektverlauf wurden bei HEGGEMANN die folgenden Verwertungsperspektiven identifiziert, die sowohl technologische als auch wirtschaftliche Potenziale adressieren und künftig systematisch weiterverfolgt werden.

1. Simulation als eigenständige Dienstleistung

- Aufbau eines Dienstleistungsangebots für OEMs zur simulationsgestützten Auslegung und Optimierung von WAAM-Bauteilen (z. B. Reduktion von Verzug an kritischen Anschlussgeometrien).
- Entwicklung standardisierter Simulationspakete zur Unterstützung früher Entwicklungsphasen, einschließlich Bahnplanung, thermo-mechanischer Prozessanalyse sowie Kosten-, Zeit- und Nachhaltigkeitsbewertungen.
- Etablierung eines Beratungsangebots zur Ableitung von Gestaltungs- und Prozessrichtlinien auf Basis thermischer und mechanischer Simulationsanalysen.

2. Industrialisierung und Serienfertigung

- Weiterentwicklung und Industrialisierung des WAAM-Prozesses durch Definition stabiler Prozessfenster, Anlagenqualifizierung und interne Qualitätsstandards.
- Durchführung von Pilotprojekten mit ausgewählten OEM-Partnern zur Umsetzung einer durchgängigen Prozesskette von der Simulation über Prototypen bis zur Vorserie.
- Aufbau eines Referenz-Bauteilportfolios zur Demonstration des technologischen Reifegrades sowie der Material- und Kosteneinsparpotenziale gegenüber konventionellen Fertigungsverfahren.

3. Vertrieb und Markterschließung

- Nutzung der Projektergebnisse zur Erstellung von Fallstudien und Kennzahlen (z. B. Materialeinsparung, CO₂-Reduktion, Wirtschaftlichkeit) zur Unterstützung des Vertriebs.
- Ausbau bestehender Kooperationen mit OEM-Partnern und Entwicklung langfristiger Zusammenarbeit im Bereich Simulation, Prototypenfertigung und Serienanwendungen.
- Positionierung der digitalisierten WAAM-Prozesskette als Beitrag zu Nachhaltigkeits- und Lieferkettenstrategien der Luftfahrtindustrie.

4. Aufbau eines neuen Geschäftsfeldes

- Aufbau eines eigenständigen Geschäftsfeldes WAAM innerhalb von HEGGEMANN mit klarer strategischer Roadmap.
- Skalierung der technischen Kapazitäten sowie der personellen Kompetenzen zur industriellen Nutzung der Technologie.
- Entwicklung integrierter Fertigungslösungen entlang der gesamten Prozesskette von der Simulation über die additive Fertigung bis zur mechanischen Nachbearbeitung und Prüfung.

5. Wissenschaftliche und technische Verwertung

- Veröffentlichung zentraler Projektergebnisse in Fachzeitschriften und auf wissenschaftlichen Konferenzen gemeinsam mit den Projektpartnern.
- Nutzung der Ergebnisse als Grundlage für Folgeprojekte sowie zur Erweiterung auf weitere Werkstoffe und Anwendungsfelder.

6. Normung, Qualität und Digitalisierung

- Überführung der im Projekt erarbeiteten Prozessfenster, Qualitätskennzahlen und digitalen Schlüsselparameter in ein internes Qualitäts- und Datenmodell.
- Weiterentwicklung des digitalen Zwillings als Planungs- und Freigabetool für zukünftige Fertigungsprojekte.
- Nutzung der aufgebauten digitalen Infrastruktur als Grundlage für weitere Digitalisierungsvorhaben, beispielsweise zur Standardisierung von Datenstrukturen und zur Umsetzung papierloser Fertigungsprozesse.

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

Während des Vorhabens recherchierte HEGGEMANN kontinuierlich den Stand der Technik zur additiven Fertigung hochfester Titanstrukturen. Außerhalb des Projektkonsortiums konnten dabei keine relevanten Fortschritte auf diesem Gebiet oder im Bereich der Prozesssimulation festgestellt werden. Generell ist jedoch eine zunehmende Nutzung digitaler Zwillinge zur Abbildung realer Prozesse erkennbar, begünstigt durch die breite Verfügbarkeit von Rechenkapazität. Während Prozesssimulationen früher isoliert eingesetzt wurden, eröffnet die durchgängige Vernetzung von Simulationen neue Möglichkeiten: Herstellprozesse können ganzheitlicher betrachtet und ökonomisch sowie ökologisch optimiert werden. Die gestiegene Komplexität erfordert jedoch die Harmonisierung von Transferparametern zwischen Input und Output verketteter Systeme.

HEGGEMANN bewertet die Verwertungsperspektive daher höher als ursprünglich angenommen und investiert in die Weiterentwicklung digitaler Methoden. Erste Untersuchungen zu neuartigen Ansätzen mit künstlicher Intelligenz, etwa tiefen neuronalen Netzen zur Vorhersage von Temperaturfeldern, wurden bereits vor Projektende durchgeführt, erfordern jedoch zusätzliche Forschungsunterstützung.

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

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

Wissenschaftliche Ergebnisse aus der ersten Projektphase wurden in einer gemeinschaftlichen Veröffentlichung der Verbundpartner unter Federführung des Projektpartners FAU, IWB (TUM) und der verlinked GmbH veröffentlicht:

HEGGEMANN hat die nachfolgend aufgeführten Vorträge auf wissenschaftlichen Fachveranstaltungen und Anwendertreffen gehalten, bei denen jeweils das QuSAM Verbundvorhaben mit seinen Zielen, seiner Projektstruktur sowie ausgewählte Ergebnisse nach vorheriger Abstimmung und Freigabe aller beteiligten Partner präsentiert wurden:

- Vortrag im Rahmen des effiPrint Netzwerktreffens an der Technischen Universität Chemnitz am 14.03.2024 in Chemnitz
- Vortrag bei der AM Fachveranstaltung RapidTech am 14.05.2024 in Erfurt
- Vortrag beim Anwendertag des Direct Manufacturing Research Centers (DMRC) am 24.09.2024 in Paderborn
- Vortrag bei der Schweißfachtagung von voestAlpine am 07.11.2024 in Emmetten (Schweiz)
- Vortrag beim Füge-technischen Kolloquium des Laboratoriums für Werkstoff- und Füge-technik am 27.11.2024 in Paderborn
- Vortrag bei der Jahreskonferenz der Materialprüfungsanstalt der Universität Stuttgart am 6.10.2025 in Stuttgart