SCHLUSSBERICHT

zum Innovationsvorhaben der HEGGEMANN AG

„**AMAvia**“– Digitalisierte Prozesskette für die innovative Kombination von Laser-Lichtbogen-Hybrid-Additive-Manufacturing (LLHAM) und intelligenten Fräsprozessen zur Produktivitäts- und Qualitätssteigerung bei der Herstellung metallischer Großstrukturen in der Aviation-Industrie

Teilprojekt:

Entwicklung, Validierung und Aufbau einer durchgängigen Fertigungsprozesskette zur Erhöhung der Wirtschaftlichkeit bei der Herstellung von Flugzeugstrukturbauteilen

Förderkennzeichen: 20W1902A

im Rahmen des 1. Aufruf des Luftfahrtforschungsprogramms VI (LuFo VI-1)

Gefördert durch:

Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Laufzeit des Vorhabens: 01.11.2020 – 30.04.2025

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 3
3. Planung und Ablauf des Vorhabens 4
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 13
4.2 Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste 13
5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen 15
Eingehende Darstellung der Projektergebnisse 16
6. Verwendung der Zuwendung und Darstellung der erzielten Ergebnisse im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele 16
HAP 0 – Projekt- und Anforderungsmanagement 17
HAP 1 – Qualifizierung des additiven Fertigungsprozesses 18
HAP 2 – Spanende Fertigbearbeitung 26
HAP 3 – Digitale Prozesskette 29
HAP 4 - Zusammenführung in Fertigungszelle & Validierung 35
HAP 5 – Qualifizierung von Aluminium/Titan 39
7. Zusammenfassung der Projektergebnisse 49
8. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises 50
9. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit 51
10. Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere bzgl. Verwertbarkeit der Ergebnisse 52
11. Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen 53
12. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr.11 53

1. Aufgabenstellung und Projektziele

Die Luftfahrtindustrie mit ihrer gesamten Lieferkette steht unter internationalem Wettbewerbs- und Kostendruck und muss zugleich die Transformation zu klimaneutralen Technologien meistern. Daher werden innovative Fertigungsmethoden benötigt, die eine wirtschaftliche, ressourcenschonende und leistungsfähige Herstellung von Großstrukturen ermöglichen. Additive Fertigung (AM) gilt hierbei als Schlüsseltechnologie, scheiterte bislang jedoch an begrenzten Bauräumen, geringen Aufbauraten und unzureichender Integration in durchgängige Fertigungsketten.

Das Verbundprojekt AMAvia hatte daher zum Ziel, eine hybride Fertigungszelle für die luftfahrttaugliche Herstellung von Aluminium- und Titan-Großstrukturen zu entwickeln. Hierzu wurden ein Laser-unterstützter Lichtbogenprozess (LLHAM) sowie intelligente subtraktive Nachbearbeitungsverfahren erforscht, miteinander verknüpft und durch eine digitale Prozesskette mit integrierter Qualitätssicherung ergänzt.

Die vier übergeordneten Projektziele lauteten:

1. Entwicklung eines qualitätsgesicherten Laser-Lichtbogen-Hybridprozesses zur additiven Fertigung von Aluminium- und Titanstrukturen mit gesteigerter Präzision und Aufbaurate.
2. Implementierung sensorunterstützter Frässtrategien zur Nachbearbeitung dünnwandiger Großbauteile unter Berücksichtigung von Eigenspannungen.
3. Aufbau einer validierten, digital vernetzten Fertigungszelle mit additiven und subtraktiven Komponenten zur durchgängigen Prozessoptimierung.
4. Entwicklung eines Qualifizierungs- und Prüfkonzepts für luftfahrtgeeignete AM-Aluminiumkomponenten.

Durch die Kombination dieser Technologien sollte erstmals ein wirtschaftliches und qualitätssicheres Gesamtverfahren für Großbauteile mit einem Bearbeitungsvolumen von bis zu 12 m³ ermöglicht werden. Damit adressierte AMAvia sowohl technologische Herausforderungen als auch strategische Ziele der Bundes- und EU-Förderprogramme zur Zukunft der Luftfahrt. Das Projekt AMAvia leistete somit einen wichtigen Beitrag zur Erreichung der förderpolitischen Ziele im Rahmen des Luftfahrtforschungsprogramms der Bundesregierung.

Durch die Entwicklung einer innovativen, digital vernetzten Fertigungszelle für die additive und subtraktive Bearbeitung von Großstrukturen stärkte das Vorhaben gezielt die Gesamtsystemfähigkeit der deutschen Luftfahrt- und Zulieferindustrie. Die im Projekt adressierten Technologien trugen zur Umsetzung der „Flightpath 2050"-Ziele der EU bei, insbesondere durch ressourceneffiziente Fertigung, Reduzierung von Materialeinsatz und Produktionskosten sowie durch die Erweiterung der Technologieführerschaft Deutschlands auf hybride additive Verfahren jenseits der Pulverbetttechnologie.

2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Teilprojekt der HEGGEMANN AG wurde am Unternehmensstandort am Flughafen Paderborn-Lippstadt in Büren durchgeführt. Seit der Gründung im Jahr 1962 als luftfahrttechnischer Betrieb hat sich HEGGEMANN als anerkannter Spezialist für die Entwicklung und Fertigung komplexer metallischer Leichtbaustrukturen in der Luft- und Raumfahrt sowie der Automobilindustrie etabliert. Mit rund 240 Mitarbeitenden deckt das Unternehmen unter dem Leitgedanken „360° – from Engineering to Production“ die vollständige Wertschöpfungskette ab – von der Entwicklung bis zur Produktion einbaufertiger Systeme.

Zum Zeitpunkt des Projektstarts Ende 2020 beschäftigte HEGGEMANN 22 Mitarbeiter im Bereich Forschung und Entwicklung. Für die Bearbeitung des Projekts standen neben ausreichender Personalkapazität im Engineering auch eine entsprechend dimensionierte Fertigungsfläche, schweißtechnische Infrastruktur sowie das notwendige Know-how zur Absicherung von Schweißprozessen gemäß gültigen Qualitätsanforderungen zur Verfügung. Während der gesamten Projektlaufzeit konnte auf modernste Qualitätssicherungsmethoden zurückgegriffen werden, darunter eine 3D-Bauteilvermessung zum berührungslosen Scannen, weitere Mess- und Prüfeinrichtungen zur Kontrolle geforderter Toleranzen und Verarbeitungsqualitäten sowie ein firmeneigenes Werkstofflabor mit zwei Werkstoffprüfern, das organisatorisch dem Engineering zugeordnet ist. Zum Abschluss des Projekts im April 2025 beschäftigte HEGGEMANN 23 Mitarbeiter im Engineering.

HEGGEMANN verfügt über langjährige und umfangreiche Kompetenzen im Umgang mit Titan- und Aluminiumwerkstoffen – sowohl in der zerspanenden Bearbeitung als auch beim Schweißen, in der Blechbearbeitung und bei der Montage ganzer Baugruppen. Vor dem Hintergrund hoher Materialkosten und erheblichem Energieaufwand besteht sowohl marktseitig als auch ökologisch weiterhin die Notwendigkeit, effizientere Fertigungsverfahren für hochpreisige und energetisch anspruchsvolle Strukturwerkstoffe wie die im Projekt verwendeten Titan- und Aluminiumlegierungen zu entwickeln und industriell umzusetzen.

Die hohe Fertigungstiefe bei HEGGEMANN, kombiniert mit einem über Jahrzehnte etablierten Qualitätsverständnis für luftfahrttaugliche Fertigungsprozesse, dem umfassenden Know-how in der Verarbeitung anspruchsvoller metallischer Werkstoffe, dem eigenen Werkzeug- und Vorrichtungsbau sowie der Erfahrung in der Entwicklung und Umsetzung komplexer Fertigungsprozesse bis zur Serienproduktion, wurde gezielt für die Zielerreichung in diesem Innovationsvorhaben eingesetzt. Auf dieser Basis konnten die im Projekt definierten Anforderungen erfolgreich umgesetzt werden.

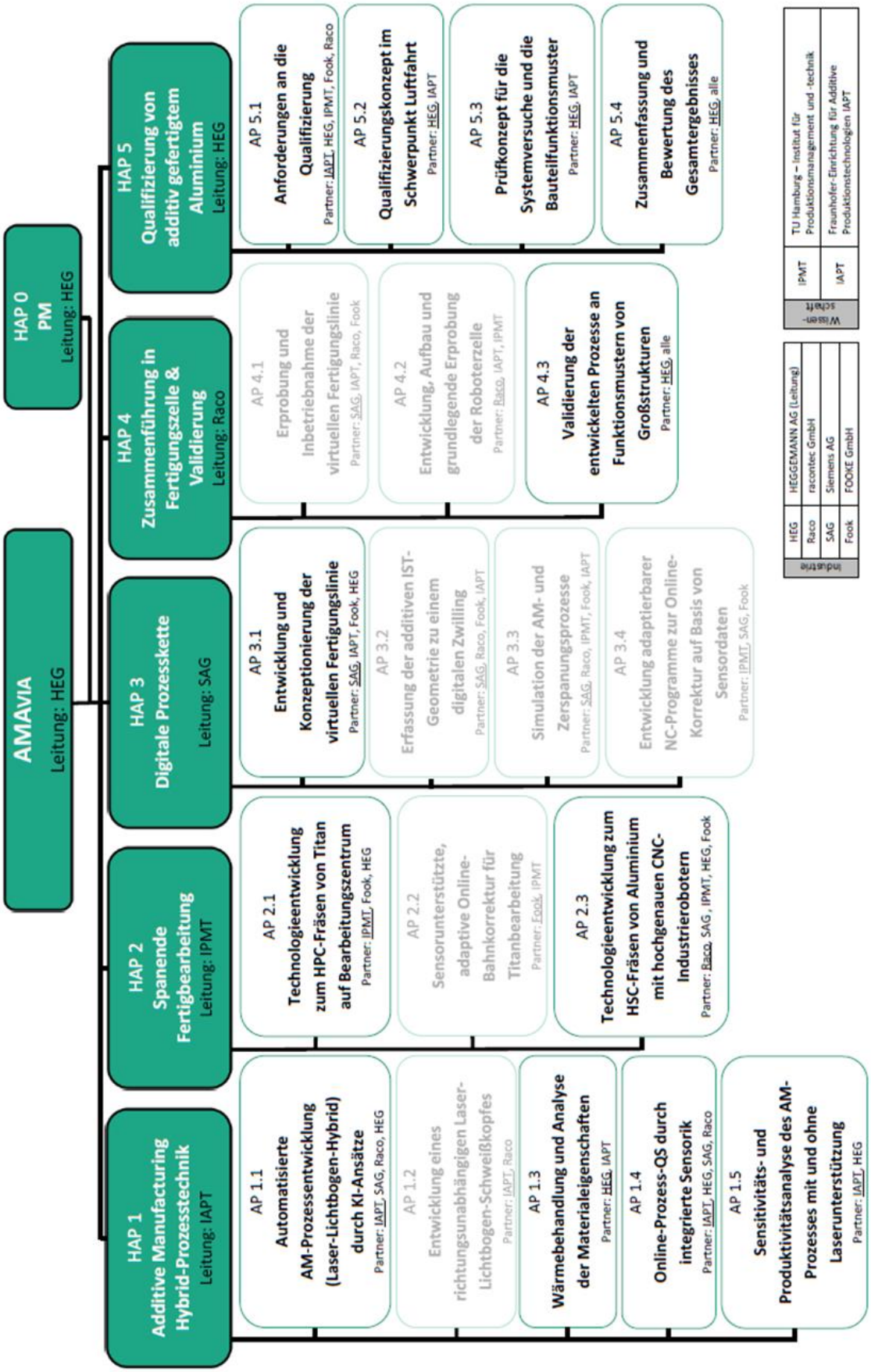
3. Planung und Ablauf des Vorhabens

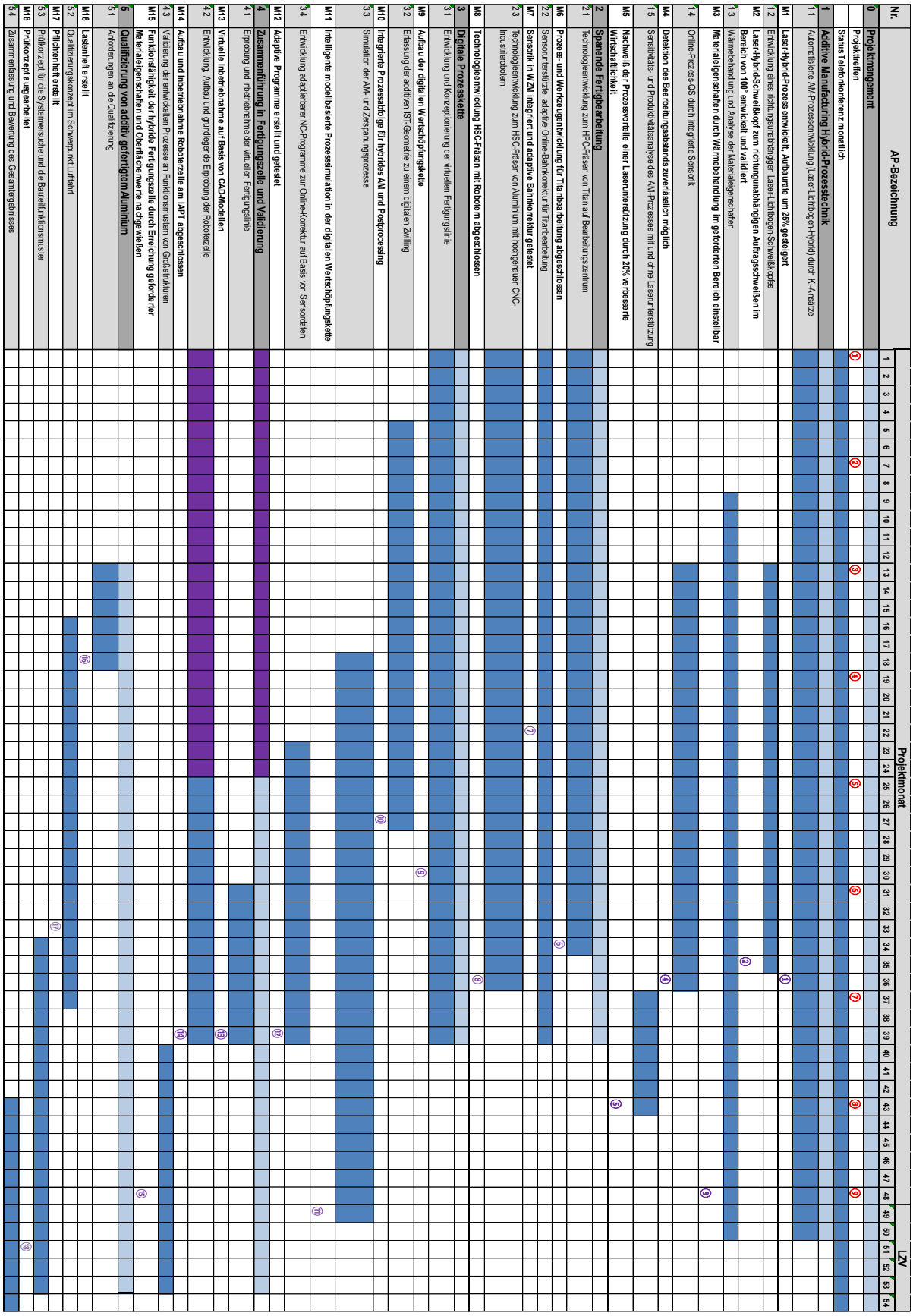
Übergeordnet zu den technischen Herausforderungen war in diesem Innovationsprojekt die Erreichung der umfassenden Projektziele innerhalb des beantragten und bewilligten Budget- und Zeitrahmens eine zentrale Herausforderung.

Der Erfolg des Verbundvorhabens hing aufgrund der hohen Komplexität und Interdisziplinarität der Entwicklungsaufgabe wesentlich von der Zusammenarbeit zwischen den Partnern sowie einer klaren Aufteilung der Verantwortlichkeiten ab. Bereits in der Antragsphase wurden die Schnittstellen zwischen den Arbeitspaketen eindeutig definiert; im Verlauf der Projektbearbeitung wurden sie immer wieder besprochen und weiter detailliert. Besonders herausfordernd war, dass HEGGEMANN erst kurz vor Beginn des Projekts die Leitung des Verbundvorhabens übernommen hatte. Zur Zielerreichung wurden die umfangreichen Arbeiten in diesem Innovationsvorhaben in fünf Hauptarbeitspakete (HAPs) mit insgesamt 18 Meilensteinen gegliedert, um die jeweils generierten Entwicklungsergebnisse zu evaluieren. Der Gesamtverbund wurde von HEGGEMANN im dafür vorgesehenen Arbeitspaket „0 – Projekt- und Anforderungsmanagement“ mit Unterstützung aller Projektpartner geführt.

HEGGEMANN war in den Arbeitspaketen AP 0, AP 1.3, AP 4.3 sowie in AP 5.2 bis 5.4 federführend. In den grün markierten Arbeitspaketen hat HEGGEMANN die Partner entsprechend unterstützt. Die inhaltliche Abstimmung zwischen den Partnern zu den verschiedenen Arbeitsschwerpunkten erfolgte im Rahmen von Projektmeetings, online Regelmeetings sowie durch bilaterale und bedarfsgerecht eingeplante Abstimmungen.

Die Arbeitspakete im Verbundprojekt sowie die Zuordnung der Verantwortlichkeiten können dem nachfolgend dargestellten Projektstrukturplan entnommen werden. Im Balkenplan des Projekts, welcher danach abgebildet ist, ist die Aufteilung der Arbeitspakete und der Meilensteine über die gesamte Projektlaufzeit zu erkennen.


AMAVIA
Leitung: HEG
HAP 0
PM
Leitung: HEG
HAP 1
Additive Manufacturing Hybrid-Prozesstechnik
Leitung: IAPT
HAP 2
Spanende Fertigbearbeitung
Leitung: IPMT
HAP 3
Digitale Prozesskette
Leitung: SAG
HAP 4
Zusammenführung in Fertigungszelle & Validierung
Leitung: Raco
HAP 5
Qualifizierung von additiv gefertigtem Aluminium
Leitung: HEG
AP 1.1
Automatisierte AM-Prozessentwicklung (Laser-Lichtbogen-Hybrid) durch KI-Ansätze
Partner: IAPT, SAG, Raco, HEG
AP 1.2
Entwicklung eines richtungsunabhängigen Laser-Lichtbogen-Schweißkopfes
Partner: IAPT, Raco
AP 1.3
Wärmebehandlung und Analyse der Materialeigenschaften
Partner: HEG, IAPT
AP 1.4
Online-Prozess-QS durch integrierte Sensorik
Partner: IAPT, HEG, SAG, Raco
AP 1.5
Sensitivitäts- und Produktivitätsanalyse des AM-Prozesses mit und ohne Laserunterstützung
Partner: IAPT, HEG
AP 2.1
Technologieentwicklung zum HPC-Fräsen von Titan auf Bearbeitungszentrum
Partner: IPMT, Fook, HEG
AP 2.2
Sensorunterstützte, adaptive Online-Bahnkorrektur für Titanbearbeitung
Partner: Fook, IPMT
AP 2.3
Technologieentwicklung zum HSC-Fräsen von Aluminium mit hochgenauen CNC-Industrierobotern
Partner: Raco, SAG, IPMT, HEG, Fook
AP 3.1
Entwicklung und Konzeptionierung der virtuellen Fertigungslinie
Partner: SAG, IAPT, Fook, HEG
AP 3.2
Erfassung der additiven IST-Geometrie zu einem digitalen Zwilling
Partner: SAG, Raco, Fook, IAPT
AP 3.3
Simulation der AM- und Zerspanungsprozesse
Partner: SAG, Raco, IPMT, Fook, IAPT
AP 3.4
Entwicklung adaptierbarer NC-Programme zur Online-Korrektur auf Basis von Sensordaten
Partner: IPMT, SAG, Fook
AP 4.1
Erprobung und Inbetriebnahme der virtuellen Fertigungslinie
Partner: SAG, IAPT, Raco, Fook
AP 4.2
Entwicklung, Aufbau und grundlegende Erprobung der Roboterzelle
Partner: Raco, IAPT, IPMT
AP 4.3
Validierung der entwickelten Prozesse an Funktionsmustern von Großstrukturen
Partner: HEG, alle
AP 5.1
Anforderungen an die Qualifizierung
Partner: IAPT, HEG, IPMT, Fook, Raco
AP 5.2
Qualifizierungskonzept im Schwerpunkt Luftfahrt
Partner: HEG, IAPT
AP 5.3
Prüfkonzept für die Systemversuche und die Bauteilfunktionsmuster
Partner: HEG, IAPT
AP 5.4
Zusammenfassung und Bewertung des Gesamtergebnisses
Partner: HEG, alle
Industrie
HEG HEGGEMANN AG (Leitung)
Raco racontec GmbH
SAG Siemens AG
Fook FOOKE GmbH
Wissen-schaft
IPMT TU Hamburg – Institut für Produktionsmanagement und -technik
IAPT Fraunhofer-Einrichtung für Additive Produktionstechnologien IAPT



Alle Entscheidungen und Freigaben im Rahmen der 18 Meilensteine wurden jeweils gemeinschaftlich und über den gesamten Projektverlauf einstimmig getroffen. Von den Meilensteinen

im Projekt wurden fünf Meilensteine von HEGGEMANN verantwortet. Dies waren Meilenstein MS 3 aus AP 1.3, MS 15 aus AP 4.3, MS 16 und 17 aus AP 5.2 und MS 18 aus AP 5.4.

Die inhaltliche Projektarbeit wurde mit dem Kick Off am 17.12.2020 mit dem Projektträger gestartet. Über die gesamte Projektlaufzeit von 54 Monaten führten die Partner im 14-tägigigen Rhythmus digitale Abstimmungsmeetings unter der Koordination von HEGGEMANN durch. Bei HEGGEMANN intern fanden zudem ebenfalls im 14-tägigen Rhythmus Arbeitsmeetings mit den im Projekt beteiligten Mitarbeitern sowie der kaufmännischen Leitung statt. Alle Verbundpartner kamen zudem an den folgenden Terminen zu Präsenz- oder Onlinemeetings zusammen. Aufgrund der Corona Pandemie waren die persönlichen Treffen im Projektverbund zu Beginn der Projektlaufzeit sehr eingeschränkt und fanden daher meistens online statt. HEGGEMANN startete daher mit Einzelbesuchen der Partner, bis das erste Face 2 Face Meeting mit allen Partnern durchgeführt werden konnte.

Während des Projektverlaufes gab es folgende Präsenztreffen außerhalb der Halbjahresmeetings:

Datum	Ort	Unternehmen / Institution / Universität
21.09.2021	Hamburg	IAPT
21.09.2021	Hamburg	TUHH
23.06.2022	München	Siemens
15./16.09.2022	Hamburg	IAPT, zu der Veranstaltung MLE-Days (Machine Learning in Engineering Conference)
28.11.2024	München	AlphaLaser, Besichtigung und Halbjahresmeeting von Racontec
15.04.2025	Hamburg	IAPT, Abschlusstreffen mit Zellenbesichtigung

Halbjahresmeetings in Präsenz konnten aufgrund unterschiedlicher Betretungsregelungen der Unternehmen erst ab 2023 für alle Partner stattfinden. Folgende Meetings haben über die Projektlaufzeit stattgefunden.

Datum	Ort	Unternehmen / Institution / Universität
14.11.2021	Online	Kickoff mit Projektträger
03.05.2022	Online	Halbjahresmeeting
22.11.2022	Online	Halbjahresmeeting
08.05.2023	HEGGEMANN	Halbjahresmeeting
28.11.2023	HEGGEMANN	Halbjahresmeeting mit Projektträger
12.06.2024	Fooke	Halbjahresmeeting
28.11.2024	AlphaLaser, Racotec	Halbjahresmeeting, mit Besichtigung
15.04.2025	IAPT	Abschlussmeeting mit Projektträger

Darüber hinaus wurde im jährlichen Turnus dem Projektträger der Fortschritt präsentiert und in Form von Zwischenberichten dokumentiert. HEGGEMANN übernahm hierbei eine zentrale Rolle in der Aufbereitung der Ergebnisse und der Abstimmung der Beiträge. Für den Datenaustausch stellte das IAPT einen SharePoint zur Verfügung. So konnte die Organisation des Projektes und das Handling größerer Datenmengen maßgeblich verbessert werden.

Die Projektlaufzeit war zum Zeitpunkt der Bewilligung im November 2020 mit 48 Monaten geplant. Aufgrund der Komplexität bei der Entwicklung und Implementierung der Prozessüberwachung zur Absicherung qualitätsbestimmender Fertigungsparameter mussten mehrere zeitintensive Iterationsschleifen durchgeführt werden. Bedingt durch Lieferengpässe gab es insbesondere bei der Anlage am IAPT merkliche Verzögerungen, und bilaterale Arbeitstreffen zur gemeinsamen Lösung technischer Herausforderungen konnten ab 2021 nur sehr eingeschränkt stattfinden. Diese Verzögerungen von in Summe ca. 6 Monaten wurden in der ursprünglich geplanten Laufzeit von 48 Monaten trotz entsprechender korrigierender Maßnahmen nicht aufgeholt.

Daher haben alle Projektpartner einvernehmlich im Jahr 2024 eine kostenneutrale Laufzeitverlängerung um sechs Monate beantragt, welche vom Projektträger mit dem Änderungsbescheid Nr. 3 vom 05.09.2024 bewilligt wurde. Innerhalb der Verlängerungsphase traten weitere Verzögerungen in der Postprozess-Erstellung auf, sodass die gemeinschaftlichen Versuche noch bis zum Ende des Projektes dauerten und Versuchsauswertungen nach Projektende zwischen IAPT und HEGGEMANN stattfanden. HEGGEMANN konnte den Abschlussbericht daher erst zum Ende der festgelegten Frist finalisieren. Mit der bewilligten Laufzeitverlängerung konnte das Vorhaben, von allen Partnern erfolgreich zum 30.04.2025 abgeschlossen werden.

Auch nach Erstellung des Abschlussberichts werden weitere Aktivitäten stattfinden, da Demonstratorbauteile von IAPT und Siemens auf der ILA 2026 ausgestellt werden. Hierbei wird HEGGEMANN entsprechend supporten und sich an dem technischen Austausch mit den Partnern beteiligen.

Die inhaltlichen Ergebnisse des Teilprojekts von HEGGEMANN bis zum Projektabschluss am 30.4.2025, welche in enger Kooperation mit den Projektpartnern erarbeitet wurden, sind im Kapitel „Eingehende Darstellung der Projektergebnisse“ detailliert beschrieben und dargestellt.

4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Der Fokus von HEGGEMANN zum Stand der Technik im Rahmen der Projektbeantragung lag auf der Recherche entsprechender Normen und Regularien. Einige davon wurden weiterentwickelt und haben sich in unterschiedlichen Industrien durchgesetzt. Nachfolgend ist hierzu ein Überblick ausgeführt, an den dann thematisch im Projekt angeknüpft wurde.

Qualifizierung und Normen

Die verfügbaren Schweißsysteme vergleichbarer Verfahren waren hinsichtlich Aufbauraten und Maßtoleranzen limitiert. Für Aluminiumbauteile fehlte zu Projektbeginn eine wirtschaftlich tragfähige Lösung. Die besonderen Anforderungen an die Lufttüchtigkeit des additiv gefertigten Materials standen im Fokus, jedoch lagen für Aluminium- und Titanbauteile keine vollständigen Zulassungsstandards vor. Bereits existierende Normen – etwa ISO/ASTM 52900 (Terminologie), ISO/ASTM 52901 (Anforderungen an Bauteile), ISO/ASTM 52910 (Konstruktionsrichtlinien), ISO 17296-2 bis -4 (Prozessüberblick, Eigenschaften, Datenverarbeitung) sowie DIN 35224 (Abnahmeprüfung im Luft- und Raumfahrtbereich) – adressierten Grundlagen, jedoch nicht die Qualifizierung des Gesamtprozesses. Weitere Normen befanden sich in Entwicklung, darunter ISO/ASTM 52902 (Testkörper), 52904 (Prozessleistung Metall-PBF), 52905 (zerstörungsfreie Prüfung), 52907–52909 (Pulver, Post-Processing, mechanische Eigenschaften) sowie die WD 52941 und WD 52942, welche speziell auf Anlagenprüfung und Bedienerqualifikation im Luftfahrtkontext abzielten. Parallel wurden branchenspezifische Spezifikationen veröffentlicht, z. B. die AIPS 01-04-020, AIMS 03-22-000 bis -002 und AIPI 01-04-020 von Airbus. Diese bezogen sich größtenteils auf Pulverbettsysteme. Weitere relevante Dokumente stammten u. a. von NADCAP, der FDA (Technical Considerations for Additive Manufactured Medical Devices) sowie von ABS (Guidance Notes on Additive Manufacturing). Die Standardisierung war somit noch lückenhaft, insbesondere bei der Prozessqualifizierung. Die Anzahl veröffentlichter Normen war geringer als die der sich in Entwicklung befindenden, was den Nachholbedarf unterstrich.

Das Verfahren des Laser-Hybrid-Schweißens galt als Stand der Technik. Erste Untersuchungen zur additiven Nutzung zeigten Potenziale – z. B. verbesserte Oberflächen [Bar18], reduzierte Spritzerbildung [Din19] – beschränkten sich jedoch auf Grundlagen. Prozessüberwachung und Wärmebehandlung wurden bislang nicht untersucht.

Prozessvariation

Für die Prozessvariation Wire Arc Additive Manufacturing plus Laser lagen keine speziellen Normen vor. Es handelt sich auch nicht um einen nach DIN EN ISO 4063 benennbaren Prozess, wobei die additive Fertigung keine Restriktionen setzt und diese in der Luft- und Raumfahrt nicht erkennbar sind. Im Gegenteil: Metallschutzgasschweißen ist normativ in der Luft- und Raumfahrt nur am Rande qualifizierbar, da diese Verfahren zum Fügen in der Vergangenheit nicht die ausreichend gute Stabilität aufwiesen, wie Wolfram-Inertgas-Schweißen oder Plasmaschweißen. In der Fügetechnik für dünne Bleche sind Verfahren mit permanent abschmelzender Elektrode schwer anzuwenden.

Somit stützt sich die Qualifizierung im industriellen Bereich auf die DIN EN ISO 15614-14 für Laser, DIN EN ISO 15614-5 für Titanlegierungen und DIN EN ISO 15614-2. Für die Luftfahrt existierte die AMS 7010 aus 01/2020 bereits für Laser-DED-Wire und die AMS 7005 für Plasma-Draht. Insgesamt zeigte die normative Landschaft eine heterogene Entwicklung. Die recherchierten Normen und Richtlinien sind in der folgenden tabellarischen Übersicht zusammengefasst.

Normennummer	**Normtitel**
ISO/ASTM 52900	Additive Fertigung Grundlagen - Terminologie
ISO/ASTM 52901	Additive Fertigung - Grundlagen - Anforderungen an die Beschaffung von additiv gefertigten Bauteilen
ISO/ASTM 52902	Additive Fertigung - Testkörper - Geometrie, Herstellung und Charakterisierung
ISO/ASTM 52904	Additive Fertigung - Prozessleistung für Metall-Pulverbettfusion
ISO/ASTM 52905	Additive Fertigung - Grundlagen - Zerstörungsfreie Prüfung von additiv gefertigten Produkten
ISO/ASTM TR 52906	Additive Fertigung - Zerstörungsfreie Prüfung - Bewusstes Einbringen von Fehlern in Bauteile
ISO/ASTM 52907	Additive Fertigung - Ausgangswerkstoffe - Verfahren zur Charakterisierung von Metallpulvern
ISO/ASTM 52908	Additive Fertigung - Nachbearbeitungsverfahren - Qualitätssicherung und Nachbearbeitung von Metall-Pulverbettfusionsbauteilen
ISO/ASTM 52909	Additive Fertigung - Bauteileigenschaften - Standardrichtlinie für Orientierungs- und Standortabhängigkeit mechanischer Eigenschaften bei Metall-Pulverbettfusion
ISO/ASTM 52910	Additive Fertigung - Konstruktion - Anforderungen, Richtlinien und Empfehlungen
ISO/ASTM 52911-1	Additive Fertigung - Konstruktion - Teil 1: Laserbasierte Pulverbettfusion von Metallen
ISO/ASTM 52911-2	Additive Fertigung - Konstruktion - Teil 2: Laserbasierte Pulverbettfusion von Polymeren
ISO/ASTM 52915	Additive Fertigung - Spezifikation für ein Dateiformat (AMF)
ISO/ASTM 52920	Additive Fertigung - Qualifizierung von Betreibern - Anforderungen an Maschinen, Materialien, Personal, Prozesse und Infrastruktur
ISO/ASTM 52921	Normbegrifflichkeiten für die Additive Fertigung - Koordinatensysteme und Prüfmethodologien
ISO/ASTM 52925	Additive Fertigung von Polymeren - Ausgangsmaterialien - Qualifizierung von Materialien für das laserbasierte Pulverbettschmelzen
ISO 17296-2	Additive Fertigung - Grundlagen - Überblick über Prozesskategorien und Ausgangswerkstoffe
ISO 17296-3	Additive Fertigung Grundlagen - Haupteigenschaften und entsprechende Prüfverfahren

ISO 17296-4	Additive Fertigung - Grundlagen - Überblick über die Datenverarbeitung
DIN 35224	Schweißen im Luft- und Raumfahrzeugbau - Abnahmeprüfung von pulverbettbasierten Laserstrahlmaschinen zur additiven Fertigung
DIN 65122	Luft- und Raumfahrt - Pulver zur Verwendung für die additive Fertigung mittels Pulverbettverfahren - Technische Lieferbedingungen
DIN EN ISO 4063	Schweißen und verwandte Prozesse - Liste der Prozesse und Ordnungsnummern
DIN EN ISO 9606-4	Prüfung von Schweißern - Schweißen von Titan und Titanlegierungen
DIN EN ISO 15614-2	Anforderung und Qualifizierung von Schweißverfahren - Schweißverfahrensprüfung - Lichtbogenschweißen von Aluminium und Aluminiumlegierungen
DIN EN ISO 15614-5	Anforderung und Qualifizierung von Schweißverfahren - Schweißverfahrensprüfung - Lichtbogenschweißen von Titan, Zirkonium und deren Legierungen
DIN EN ISO 15614-14	Anforderung und Qualifizierung von Schweißverfahren - Schweißverfahrensprüfung - Laser-Strahlschweißen
AMS 7010	Additive Manufacturing - Directed Energy Deposition (DED) - Wire Based - Aerospace
AMS 7005	Plasma Arc Additive Manufacturing - Wire Based - Aerospace
AWS D17.1/D17.1M	Specification for Fusion Welding for Aerospace Applications
NADCAP AC7110/7	Nadcap Audit Criteria for Non-Conventional Machining (Additive Manufacturing)
Airbus AIPS 01-04-020	Airbus Industry Procurement Specification - Additive Layer Manufacturing (ALM) of Metallic Parts for Series Production
Airbus AIMS 03-22-000	Airbus Industry Material Specification - Metallic Materials for Additive Manufacturing
VDI 3405 Blatt 2.1	Additive Fertigungsverfahren - Laser-Strahlschmelzen metallischer Bauteile - Materialkenndatenblatt
VDI 3405 Blatt 2.8	Additive Fertigungsverfahren - Qualifizierung für Serienfertigung

Wärmebehandlung

Aufgrund der neuen metallurgischen Gegebenheiten einer Prozesskombination von WAAM und Laserstrahl wurde bei der Wärmebehandlung geprüft, ob es durch die zu erwartenden metallurgischen Eigenheiten andere Wärmebehandlungen und/oder Wärmebehandlungseffekte durch den Prozess bereits enthalten waren und dadurch eine Optimierung der Wärmebehandlungsabläufe legitim ist. Durch den Laserstrahl wird eine weitere Zwangskraft ins Schmelzbad eingebracht, die selbst dynamisch in Leistung und Ort (Wobbelmuster u.a.) sein kann. Dadurch werden die Marangoni-Kräfte in Grenzen beeinflusst und auch die reversible Drahtförderung durch Cold Metal Transfer (CMT) wirkt durch die gezielte spritzerfreie Tropfenablösung positiv auf diese Thermik.

HEGGEMANN verwendete hierfür die nachfolgend aufgeführten Literaturquellen, Normen und Richtlinien, die aus dem allgemeinen Stand der Technik für Wärmebehandlungen abgeleitet werden können.

Kürzel	**Titel**
[Zoc]	H.W. Zoch et.al.: Handbuch Wärmebehandeln und Beschichten, Hanser, 1.Auflage, 2015
[AMS]	AMS 2770 - Heat Treatment of Wrought Aluminum Alloy Parts, 2020-08
[ASM]	ASM International Handbook Committee: ASM Handbook, Volume 04 - Heat Treating, ASM International, 1991
[DIN]	DIN 65084: Luft- und Raumfahrt; Wärmebehandlung von Titan und Titan-Knetlegierungen, 1990-04
[DIN2]	DIN 29850: Luft- und Raumfahrt; Wärmebehandlung von Aluminium-Knetlegierungen, 1989-10

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 recherchiert werden. Die Referenzen zu den verwendeten Literaturquellen des Standes der Technik und Normen sind nachfolgend ausgelistet und aus dem Text verlinkt.

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

Sowohl für die Projektbeantragung als auch parallel zur Projektlaufzeit wurde insbesondere zu den Meilensteinen des Innovationsvorhabens der Stand der Technik hinsichtlich neuer Veröffentlichungen zu lichtbogenbasierten Additiven Fertigungsverfahren (WAAM und Hybridprozesse) für Aluminium- und Titanlegierungen recherchiert. Hierzu wurden neben den Suchprogrammen im Internet entspr. Förderdatenbanken und die Technische Informationsbibliothek Hannover sowie moderne KI-Methoden, wie Consensus verwendet. Über den Projektverlauf konnte ein zunehmendes Interesse am Markt und damit einhergehend eine zunehmende Zahl an Veröffentlichungen im Bereich WAAM beobachtet werden. Bestimmte Bereiche, wie Simulation und die Verwendung von künstlicher Intelligenz sind 2022 bis 2023 stark beflügelt worden [Che], hat aber bereits einen abnehmenden Trend in 2025 durch die starke Fokussierung auf den KI- und Nachhaltigkeitsmarkt. Eine gute Zusammenfassung für WAAM bietet eine aktuelle Review Studie [Che], aus der die folgende Grafik entnommen wurde.

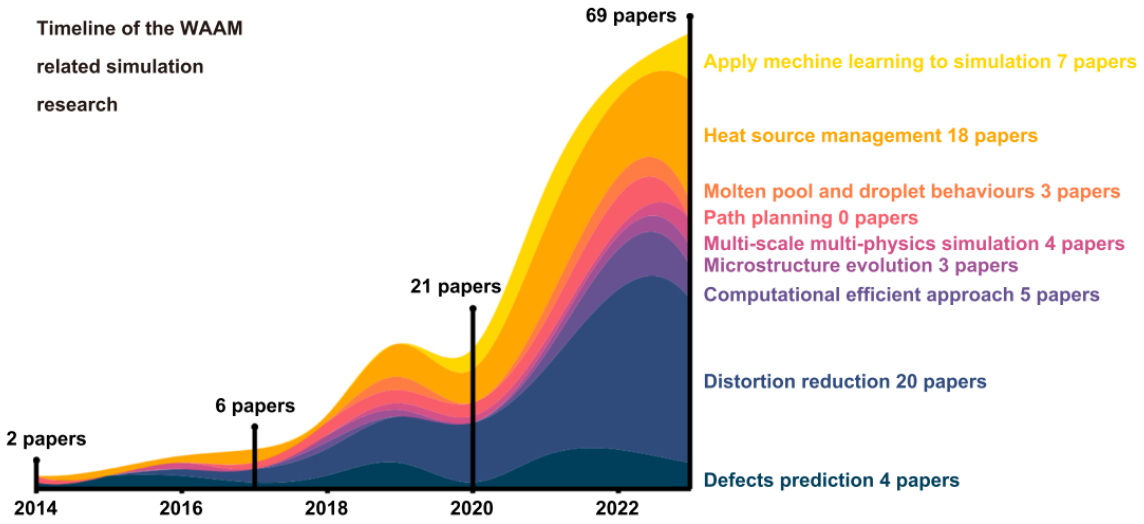


Figure 2. Timeline of the WAAM-related simulation research.

Weitere zukünftige Entwicklungen werden die Ausweitung von Simulation über mehrere Skalen hinweg sein, die weitere Ausarbeitung von Digitalen Zwillingen mit Echtzeitfähigkeiten durch KI, wie Physical Informed Neural Networks (PINNs), inverse PINNs durch mehr verfügbare Daten und dann Rückrechnung von Eingangsparametern (Optimierung) sowie DeepO-Nets, mit denen unterschiedliche Randbedingungen mit trainiert werden und dadurch ganze

Funktionenräume gelernt werden können. Das macht die wiederholte Lösung von partiellen Differentialgleichungen für verschiedene Parameterkonfigurationen überflüssig und ermöglicht so eine nahezu echtzeitfähige Vorhersage komplexer physikalischer Systeme (im Bereich von Millisekunden). Eine erste Übersicht liefert [Tae], wie nachfolgend dargestellt.

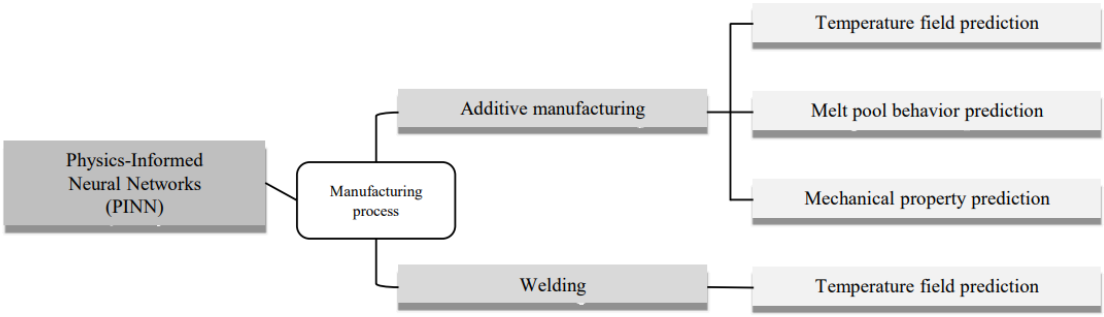


Fig. 1 Classification of PINN research papers on additive manufacturing and welding processes

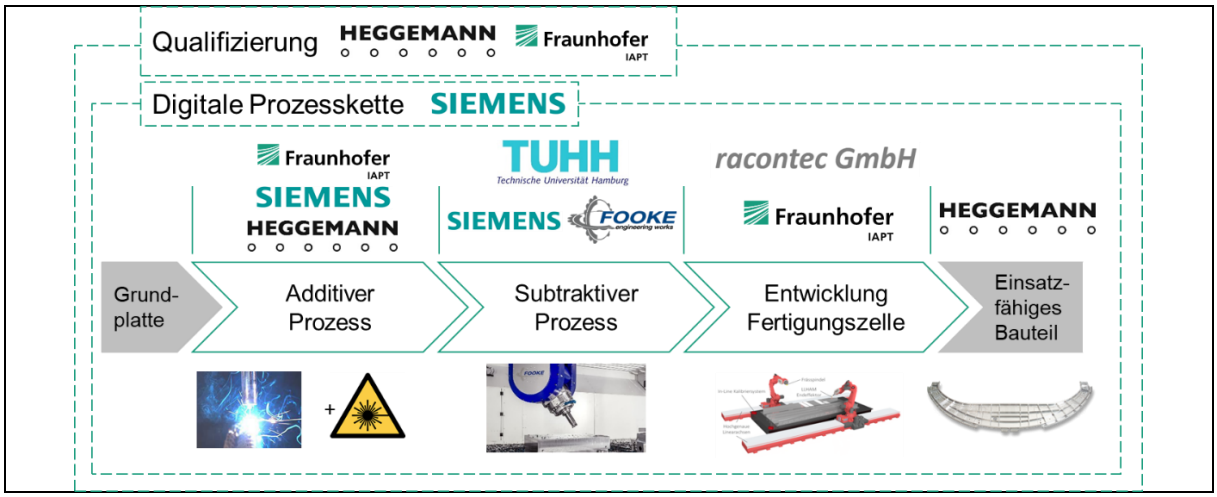
Kürzel	**Titel**
[Che]	Z. Chen et al.: A comprehensive review and future perspectives of simulation approaches in wire arc additive manufacturing (WAAM), Int. J. Extrem. Manuf. 7 022016, 2025
[Tae]	T. Ko et al.: Review of Recent Additive Manufacturing and Welding Research with Application of Physics-Informed 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

Aufgrund der interdisziplinären Zusammensetzung des AMAvia-Projektkonsortiums waren seitens HEGGEMANN lediglich zwei F&E-Unterbeauftragungen erforderlich, die gezielt spezifische Mess- und Analyseaufgaben abdeckten. Die erste Unterbeauftragung erfolgte an die Technische Hochschule Ostwestfalen-Lippe und umfasste optische 3D-Messungen der additiv erzeugten Strukturen, um präzise Geometrie- und Oberflächeninformationen zu gewinnen. Die zweite Unterbeauftragung wurde an die Universität Paderborn vergeben und zielte auf hochauflösende Thermografiemessungen bei Temperaturen deutlich über 1.000 °C ab, um die thermische Prozessführung während der additiven Fertigung detailliert zu quantifizieren. Alle weiteren wissenschaftlichen Fragestellungen konnten in enger Kooperation mit der Technischen Universität Hamburg, ebenfalls geförderter Projektpartner, bearbeitet werden.

Darüber hinaus wurde während des Projektverlaufs die Boeing Company mit ihrem Entwicklungsstandort für metallische Werkstoffe und Fertigungsprozesse für die Metallverarbeitung inkl. additiver Verfahren als assoziierter Partner in den Verbund eingebunden. Der fachliche Austausch mit Boeing konzentrierte sich insbesondere auf die zukünftige strategische Ausrichtung additiver Fertigungsverfahren in der Luftfahrt sowie auf die damit verbundenen Qualitätsanforderungen an die Prozesse. Dieser Austausch erfolgte konstruktiv und lösungsorientiert und trug maßgeblich zur praxisnahen Validierung der entwickelten Verfahren bei.

Die folgende Abbildung veranschaulicht die Struktur des Projektverbunds und die Rolle der geförderten Partner entlang der additiven Prozesskette, wobei sowohl die wissenschaftlichen Aufgabenstellungen als auch die industrielle Einbindung der Partner dargestellt werden.



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

Eingehende Darstellung der Projektergebnisse

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

Die Zielstellung des Projekts war die Entwicklung einer nach luftfahrttechnischen Qualitätsstandards qualifizierbaren Fertigungsprozesskette von additiver und spanender Bearbeitung zur ressourceneffizienten Herstellung von Titan- und Aluminiumgroßstrukturen.

Mit dem Zuwendungsbescheid vom 23.10.2020 wurde das Projekt zum 1.11.2020 bewilligt. Die inhaltlichen Arbeiten starteten somit Ende 2020. Nach einer kostenneutralen Laufzeitverlängerung konnte das Gesamtprojekt inkl. aller Teilprojekte zum 30.4.2025 erfolgreich abgeschlossen werden. Die Hauptziele und die daraus abgeleiteten Zielerreichungskriterien der Meilensteine wurden vollumfänglich erreicht. Die quantitative Bewertung der Zielerreichung wurde anhand eines skalierten Referenzbauteils zum Ende des Projekts in Abstimmung mit dem industriellen Projektpartner Siemens und dem wissenschaftlichen Verbundpartner IAPT durchgeführt.

Nachfolgend sind die im Verlauf des Vorhabens von HEGGEMANN erarbeiteten Ergebnisse, nach Hauptarbeitspaketen und Arbeitspaketen strukturiert, eingehend beschrieben und dargestellt.

HAP 0 – Projekt- und Anforderungsmanagement

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

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

Für HEGGEMANN als schweißtechnischer Fachbetrieb und für die Prozessqualität verantwortlicher Partner gestaltete sich eine sehr gute Zusammenarbeit mit den Projektpartnern. Über den vom Projektpartner Fraunhofer IAPT bereitgestellten Share Point konnte HEGGEMANN dem Projektverbund jederzeit alle relevanten Daten und Dokumente online zur Verfügung stellen. Termine und Berichtszeiträume wurden dort ebenfalls bekanntgegeben. Über die Projektlaufzeit von in Summe 54 Monaten erstellte HEGGEMANN fristgerecht die erforderlichen Berichte und Nachweise unter Verwendung des Portals „Easy Online“. Die Aufwände wurden mittels entsprechender Zahlungsanforderungen quartalsweise abgerechnet.

HAP 1 – Qualifizierung des additiven Fertigungsprozesses

Das Hauptarbeitspaket 1 (HAP 1), unterteilt in fünf Arbeitspakete, zielte auf die Entwicklung eines stabilen Laser-Lichtbogen-Hybrid-Prozesses für additive Zwecke ab.

AP 1.1 – Automatisierte AM-Prozessentwicklung (Laser-Lichtbogen-Hybrid) durch KI-Ansätze

Arbeitspaket 1 konzentrierte sich neben der Entwicklung der Hybrid-Prozesstechnik mit dem Ziel, eine höhere Aufbaurate zu erreichen, auch darauf, ein umfassendes Lastenheft für die zu erstellende Plattform, aber auch für KI-Lernmethoden zu erstellen. Dieses beinhaltete die Auswahl von Prozessparametern und Umgebungsfaktoren, und woraus sich auch eine systematische Vorgehensweise für Versuche und Datenerfassung ergab.

Für die qualitative Prozessbeschreibung wurden bestehende Normen und Spezifikationen verwandter additiver Fertigungsverfahren analysiert. Dabei dienten insbesondere die NADCAP Checkliste AC7110/14, die AMS-Normen 7005 (Plasma-Draht) und 7010 (Laser-Draht) sowie die DIN-Spezifikationen 17071 und 17024-2 als Grundlage für eine Beschreibung des zu entwickelnden Prozesses. Die NADCAP Checkliste eignet sich als Qualitätsorientierung für Spezialprozesse, da sie über EN 9100 und ISO 9001 hinausgeht. Spezialprozesse wie Schweißen müssen aufgrund ihrer dynamischen Wärmeeinwirkung geregelt werden. In der Luft- und Raumfahrt werden diese Prozesse in thematischen Checklisten beschrieben, um Zulieferern separate Zulassungen für jeden OEM zu ersparen. Die Checklisten umfassen umfassende Anforderungen an Lagerung, Transport, Sauberkeit und Personal und werden durch Audits überprüft.

Eine wichtige Entwicklung war die Festlegung der DED-Verfahren als Urformverfahren. Ursprünglich wurden diese aus der Fügetechnik abgeleitet, wodurch ungeeignete Bewertungsstandards für Schweißverbindungen verwendet wurden. Mit AMS 7005 und 7010 wurden Plasma-Draht- und Laser-Draht-Verfahren bereits durch sogenannte Key Values technisch beschrieben. Das Konsortium entschied sich, den Hybrid-Prozess entlang einer Prozesszulassungsbeschreibung zu entwickeln und ebenfalls anhand von Key Values zu charakterisieren. Auch die Fräsbearbeitung in der Kammer wurde nach diesem Schema beschrieben, was zusätzliche Vorteile bot.

Das IAPT entwickelte zusammen mit HEGGEMANN eine Planungsübersicht und stimmte mit den anderen Partnern die Umsetzung in Hardware, Schnittstellen und Software ab. Einen Auszug zeigt die nachfolgende Abbildung.

Lfd Nr.	Parameter	Beschreibung	Kontrolltyp	Auswirkungen	SPC	Hardware
M1	Schweißstrom	Die Menge an Energie zum Aufschmelzen des Grundmaterials	Bereich (Range)	Schmelzbadeigenschaften, Aufbaueigenschaften/Mikrostruktur und Materialeigenschaften	X	
M2	Schmelzbadgröße	Die Menge an aufgeschmolzenen Grundmaterials	Bereich (Range)	Verzug, Prozesstabilitätsbedingungen		X
M3	Vorwärmbedingungen	Der thermische Zustand des Werkstücks vor dem Beginn der Abscheidung	Bereich (Range)	Verzug und Werkstoffveränderung		X
M4	Zwischenlagentemperatur	Die thermische Bedingungen zwischen den Aufbaulagen	Bereich (Range)	Schmelzbadeigenschaften, Aufbaueigenschaften/Mikrostruktur und Materialeigenschaften		
M5	Andere Prozesswärmebeeinflussung	Die Menge zu- und abgeführter thermischer Energie	Bereich (Range)	Schmelzbadeigenschaften, Aufbaueigenschaften/Mikrostruktur und Materialeigenschaften	X	
M6	Drahtzuführgeschwindigkeit	Der Draht wird der Schmelzzone mit einer festgelegten Geschwindigkeit zugeführt	Bereich (Range)	Schmelzbadcharakteristik, Schmelzrate und Aufbauraupenprofil	X	

Diese auf Wire Arc Additive Manufaturing (WAAM) basierende Übersicht wurde um die Laserparameter erweitert und wie nachfolgend dargestellt so zusammengefasst, dass redundante Parameter entfallen.

Lfd Nr.	Parameter	Beschreibung	Kontrolltyp	Auswirkungen	SPC	Hardware
L1	Laserleistung	Die an das Schmelzbad abgegebene Menge an Laserleistung	Bereich	Schmelzbadcharakteristik, Auftragseigenschaften, Materialleistung	X	
L2	Größe des Laserspots	Der Durchmesser des Laserstrahls am Schmelzbad	Bereich	Schmelzbadeigenschaften, Auftragseigenschaften, Mikrostruktur und Materialleistung	X	
L3	Sonstige Prozesswärmezuführung	Die Menge an sonstigen Wärmeenergie, die an das Substrat und/oder den Draht abgegeben wird	Bereich	Schmelzbadcharakteristik, Auftragseigenschaften und Materialleistung		
L4	Vorwärmbedingungen	Der thermische Zustand des Werkstücks vor dem Start der Auftragung	Bereich	Verzug, Materialleistung		X
L5	Temperatur	Der thermische Zustand des Werkstücks während des Auftragens	Bereich	Schmelzbadcharakteristik, Auftragseigenschaften, Mikrostruktur und Materialleistung		X

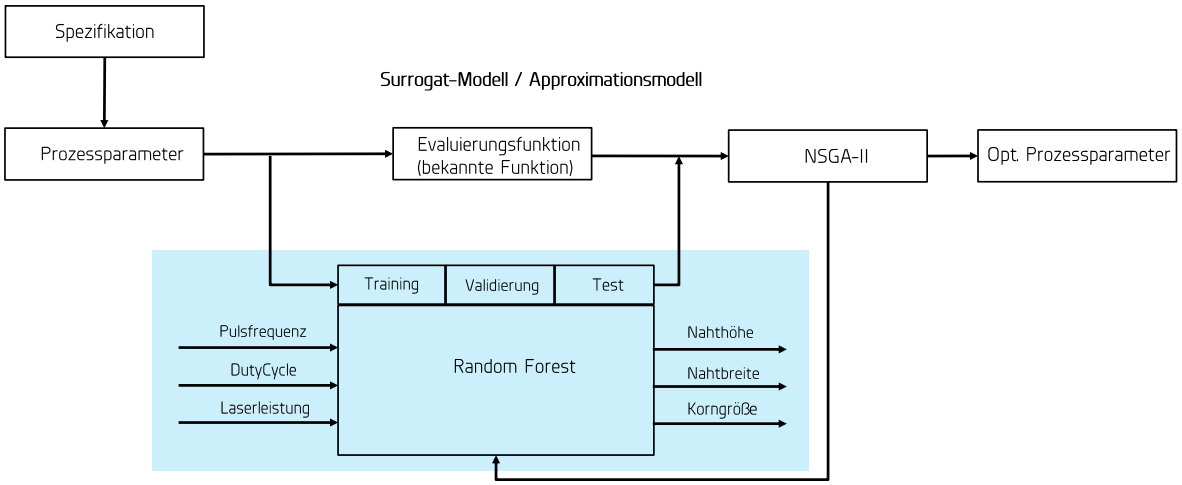
Im Anschluss erfolgte die Weiterverwendung für das Lasten-/Pflichtenheft, welches für die Planung, Beschaffung, Inbetriebnahme, Erstellung von Dashboards, Simulationseingaben, Validierung und Qualitätsnachweis die Grundlage war.

Als Basis wurden außerdem die Inhalte einer Additiven Fertigungsanweisung festgelegt, die alle Parameter enthält, die für eine wiederholbar gleichbleibende Qualität essentiell sind. Alle Einflüsse auf die lokale Temperaturhistorie und Umgebungs- sowie Randbedingungen werden darin definiert und über Probentests und/oder Bauteiltests bestätigt.

Typischerweise orientierte sich die Werkstoffauswahl bei den Aluminiumlegierungen am Metallic Materials Properties Development and Standardization (MMPDS). Da die Additive Fertigung sich an Halbzeugen orientiert, durch die von LLHAM oder WAAM erzeugte gröbere Außenstruktur, hat das Konsortium sich entschlossen sich an moderne Legierungen wie Titan-Bor nanolegierten und der Hauptlegierung EN AW 6060 zu halten. Diese sind preislich sehr attraktiv und erst kurz vor Projektstart erstmalig schweißbar auf den Markt gekommen. Die EN AW 2023 war ebenfalls im Fokus, wurde aber nur für die Wärmebehandlung verwendet. Ansonsten wurden naturharte Legierungen (5000er) zum Einfahren von Prozessen verwendet.

Die Legierung Ti-6Al-4V war bereits vor Beginn des Projektes bei Antragserstellung in Abstimmung mit allen Partnern festgelegt worden.

Bezüglich der KI-Strategien wurden mögliche Ziele definiert und im Anschluss Modellanalyse und Architektur festgelegt. Zu Beginn wurde die Vorhersage nach Prozessauswirkungen fokussiert, dies entspricht dem überwachten Lernen, später als metallurgisch günstige Effekte im Mikrogefüge vermutet wurden, wurde das Ziel auf metallurgische Outputgrößen gelegt. Die Inputgrößen wurden erst mit der Kombination aus WAAM + Laser mit Drahtvorschub, Schweißgeschwindigkeit und Pulsfrequenz, durch Einzellinienversuche am IAPT zeigt sich aber, dass bei Stabilisierung des WAAM Grundprozesses, die Inputgrößen eher auf die Laserstrahlquelle erfolgte, mit Pulsfrequenz, Duty Cycle und Laserleistung mit gleichbleibender Geschwindigkeit. Die Variation der Parameter fand mit einem vollfaktoriellen Versuchsplan innerhalb der physikalisch sinnvollen Prozessgrenzen statt. Vor den Einzelversuchen wurde das KI-Modell bereits mit synthetischen Daten aufgebaut und getestet. Der dabei verwendete Ansatz (Surrogat Modell) ist nachfolgend schematisch dargestellt.



Der Random-Forest-Algorithmus eignete sich aufgrund der geringen Datensatzgröße und der Robustheit bei fehlenden Werten vor dem XGBoost, der grundsätzlich eine bessere Leistung bei strukturierten tabellarischen Daten zeigt. Die anfängliche Idee tiefe neuronale Netze zu verwenden, scheiterte jedoch an der geringen Datenmenge, solche Ansätze sind in der Auswertung von Sensorwerten zur Vorhersage von Zeitreihen (z.B. für Alertsysteme und Predictive Maintenance) für Digitale Zwillinge geeignet, wurden aber hier nicht weiterverfolgt. Die Herangehensweise an Datenermittlung aus Sensoren folgte aber dem hier verwendeten Ansatz. Während der Random Forest die Funktion der Ein- und Ausgänge durch unkorrelierte

Entscheidungsbäume auf zufälligen Teilmengen der Eingangsdaten approximiert. Da der Random Forest nur für bestimmte Eingabewerte eine Ausgabe erzeugt, kann er nicht beantworten, welche Parameter optimal wären um einen bestimmten Output zu erzeugen. Dies war die Aufgabe des NSGA2 Algorithmus, der den Parameterraum des Random Forest systematisch untersucht, um die optimalen Eingangsparameter zu finden.

Insgesamt zeigte sich, dass in diesem frühen Stadium der Parameterfestlegung die Architektur von KI-Modellen mit angelegt werden sollte, da die Erstellung von Features oder die Abtastraten oder Transformationen von Eingangsdaten noch ganz einfach erledigt werden können. Ist das Layout erstmal festgelegt, dann sind mitunter aufwändige Datentransformationen oder Feature Engineering erforderlich.

AP 1.3 – Wärmebehandlung und Analyse der Materialeigenschaften

In AP1.3 wurden die Werkstoffe festgelegt, die zusätzlich nochmal anhand ihrer Wärmebehandlungseigenschaften untersucht wurden. Zu Beginn erfolgte durch HEGGEMANN eine Einführung in die Aluminiumlegierungen nach MMPDS und welche Normen für diese Legierungen herangezogen wurden und welche konkreten Wärmebehandlungen für Halbzeuge gelten. Dies konnte für die EN AW 6060 Legierung und die Ti-6Al-4V gemacht werden sowie für die EN AW 2319 und EN AW 2024. Die borlegierte EN AW 6060 spielte noch keine Rolle zum damaligen Zeitpunkt. Die Untersuchung der Aluminiumlegierungen erfolgte nur für WAAM gefertigte Legierung, dort untersuchte Siemens mit hybriden Versuchen im Vorfeld die Auswirkung von Laserhybrid, der dem LLHAM Verfahren physikalisch entspricht. Die erreichbaren Eigenschaften typischer WAAM-Bauteile sind den Zwischenberichten zu entnehmen, hier erfolgt nur die Zusammenfassung und Ableitung einer individuellen Wärmebehandlungsroute.

Eine konventionelle Wärmebehandlung für den EN AW 6060 erfolgt bei 525-540°C im Salzbad oder im Luftumwälzofen bei entsprechender Haltedauer, die von der Wandstärke abhängt (z.B. bei 12mm ca. 90 Minuten im Luftumwälzofen). Das Abschrecken erfolgt an Luft, wobei die max. zulässige Abkühldauer auf 200°C beträgt 40s bis 60s. Warmauslagern erfolgt bei 155°C bis 190°C bei 4h bis 16h. Bei diesem Schritt werden feine Ausscheidungen (β''-Phase und β'-Phase) aus dem übersättigten Mischkristall gebildet, die zur gewünschten Festigkeitssteigerung führen. Der Zustand T6 repräsentiert die maximale Festigkeit nach Warmauslagerung. Andere Zustände, die auf Kaltverformung beruhen, sind nach der additiven Fertigung durch eine Ausscheidungshärtung nicht erreichbar. Alternativ wird die Kaltauslagerung T4 nach 5 bis 8 Tagen erreicht.

Grundsätzlich können schweißtechnische Gefüge nicht auf T6 wärmebehandelt werden, da der Ausgangszustand vor der Wärmebehandlung nicht definiert ist. Somit ergibt sich bereits ohne weitere Untersuchung die Vermutung einer Reduzierung der maximal erreichbaren Festigkeit im Vergleich zu gewalzten Halbzeugen. Der Zustand, der nach dem Schweißen und Lösungsglühen und Warmauslagerung erreicht werden kann, wird als T62 bezeichnet. Das gilt demzufolge auch für additive Herstellung der WAAM oder LLHAM Verfahren, da der Wärmezyklus hauptsächlich vom Wire Arc Additive Manufacturing Prozess dominiert wird. Bereits für diese ergeben sich die in der folgenden Übersicht dargestellten Unterschiede in der Warmauslagerung (Auszug AMS 2770):

Alloy	Form	Starting Temper (4)(5)	Final Temper(2)	Mand, Pref or Alt.(1)	1st Step Temp °F	1st Step Temp °C	1st Step Time(12) Hours	2nd Step(14) Temp °F	2nd Step(14) Temp °C	2nd Step(14) Time(12) Hours	Notes(4)
6061	All	AQ, W	T4, T42	M	Room		N/A				(10)
6063		T4	T6	P	350	177	8 to 10				(5)
6066		T42	T62	A	320	160	18 to 34				(5)

Grundsätzlich ergaben sich aus eigenen Versuchen aufgrund der Streuungsüberlagerung keine signifikanten Unterschiede zwischen den Wärmebehandlungsvarianten für den gealterten zum nicht gealterten Zustand. Für eine gealterte Struktur, wie es gerade bei dickeren Bauteilen angenommen wird eine erhöhte Zeit in der Warmauslagerungsphase empfohlen. Es wird daher vorgeschlagen, dass es bei den Annahmen für eine Wärmebehandlung gemäß DIN 29850 – Wärmebehandlungen von Aluminiumlegierungen in der Luft- und Raumfahrt bzw. AMS 2770 - Heat Treatment of Wrought Aluminum Alloy Parts bleibt.

Siemens führte im Verlauf des Projektes weitere Untersuchungen durch. Die entsprechenden Ergebnisse führten zur Berücksichtigung in der Prozessführung und Bahnplanung um Poren, Start- und Stopp-Bedingungen sowie Heißrisse zu vermeiden. Im Projekt hatte HEGGEMANN Boeing als assoziierten Partner gewonnen, die für die Aluminiumlegierungen 2319 und 2024 noch weitere Hinweise zu Festigkeiten und Wärmebehandlungen geben konnten. Auch für diese Werkstoffe ergibt sich keine weitere Wärmebehandlungsabfolge. Es wurde zusätzlich darauf hingewiesen, dass Wärmebehandlungen außerhalb von Regelwerken schwierig sind und eigene Versuchsreihen benötigen. Demzufolge sind Erkenntnisse aus der Forschung wichtig, allerdings sind die Potentiale vorerst höher, mögliche geringere Festigkeiten in Kauf zu nehmen, da abgewandelte Wärmebehandlungen noch andere Werkstoffeigenschaften negativ beeinflussen können.

Ein sehr wichtiger Hinweis von Boeing war zudem, dass bei der TiB-legierten Version ein Fokus auf der Verteilung der Nanopartikel bei der Herstellung zu legen ist, da eine Wärmebehandlung Ansammlungen in bestimmten Erstarrungsbereichen nicht mehr gleichverteilen kann aufgrund der Partikelgrößen. Daher ist prozesstechnisch auf eine möglichst exakte Herstellung, Verarbeitung, und Bahnplanung zu achten, so dass Schmelzbäder mit gleichbleibenden Schmelzbadgrößen anzustreben sind. Zusammengefasst sind Alterungserscheinungen, das Erstarrungs- und Wiederaufschmelzgefüge sowie Wärmeeinflusszonen Haupteinflussfaktoren, die sich im Vergleich zum Mehrlagenschweißen nicht wesentlich von WAAM und LLHAM unterscheiden und eine Beibehaltung der Parameter in den genannten Normen für die Wärmebehandlung sinnvoll erscheinen lassen. Wie sich bei den nanolegierten Aluminiumlegierungen Konglomerate prozesssicher für die additive Fertigung in einem volumetrischen Körper gleichverteilen lassen ist ein separates Forschungsthema.

Wie im Antrag beschrieben, wurden für Ti-6Al-4V aus dem durch REGULUS (Förderkennzeichen 20W1709A) für WAAM vorgeschlagene Wärmestrategie als Vergleich für die weitere Betrachtung des LLHAM Prozess zugrunde gelegt. In REGULUS wurde das Hauptaugenmerk auf die Zwischenlagentemperaturvariation gelegt und mit umfassenden Versuchen mit unterschiedlichen Halbzeugen und eingekauften Bauteilen (u.a. Norsk Titanium) durchgeführt. Abgeleitet davon wurde für LLHAM eine Zwischenlagentemperatur von 150°C bis 400°C vorgeschlagen.

Innerhalb des Projektes wurden dann weitere Erkenntnisse erarbeitet, welche eine Abhängigkeit der erreichbaren Festigkeit nach dem Spannungsarmglühen aufzeigten. Diese wurden allerdings nicht weiter vertiefend untersucht, da die Anzahl der Proben für einen solchen Vergleich aufgrund der Verzögerungen im Anlagenaufbau am IAPT nicht mehr realistisch war. Zudem wäre ein externes Kühlsysteme innerhalb der Schutzgaskammer erforderlich.

Diese Erkenntnisse stellen allerdings in Aussicht, dass eine Verringerung der Wartezeiten zwischen den Layern, einer Produktivitätssteigerung zu Gute kommt. Der Grad der Steigerung konnte aus den genannten Gründen nicht exakt quantifiziert werden. Mit zusätzlicher Gaskühlung mit einem Luftvorhang (Argon durchflutet) konnte aber bereits im Projekt die Wartezeit zwischen den Layern um 50% reduziert werden, was in Bezug auf das Ziel einer Produktivitätssteigerung sehr positiv zu bewerten ist.

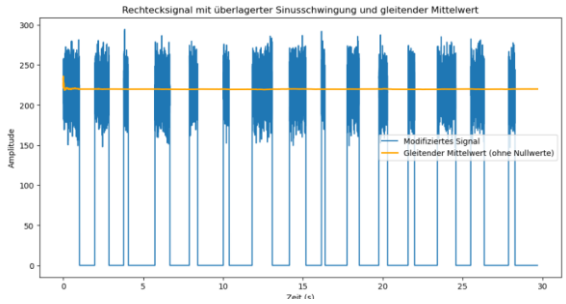
AP 1.4 – Online-Prozess-QS durch integrierte Sensorik

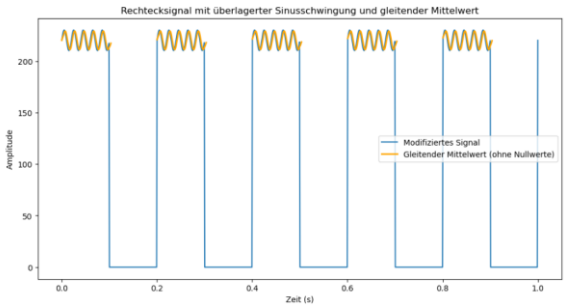
Innerhalb dieses Arbeitspaketes unterstützte HEGGEMANN mit der Erfahrung aus dem eigenen WAMM-Prozess bzgl. Vorgehensweise, der zu beachtenden Normen sowie schon verwendeten Sensoren, nachgelagerter Datenauswertungsmöglichkeiten und Anwendung mit KI-Methoden. Dies folgte logisch auf die Festlegung der Architektur in AP 1.1. Weiterhin konnte HEGGEMANN in AP 1.4 auch bei der Festlegung von Präparationsnormen und bei der Entwicklung einer Vorgehensweise für die zerstörungsfreie und zerstörende Werkstoffprüfung die Partner unterstützen.

Es wurden weiterhin Strategien ausgearbeitet, wie der Drahtvorschub, als einer der essentiellen Parameter zur Temperatursteuerung, online erfasst und somit für die Bahnplanung als Korrektur verwendet werden kann. Dies war im Gesamtkontext interessant, da HEGGEMANN eine andere Korrektur verwendet als Siemens.

Es wurde ein Ansatz erarbeitet und weiterverfolgt, bei dem eine interne Messung über die Fronius Stromquelle mittels WireSense durchgeführt wird, um im Programmcode einen Offset an die Höhenvariable anzufügen. Bei Siemens wird die Höhe mit Vorversuchen eingefahren und berücksichtigt. Beide Varianten zeigten Vor- und Nachteile. Vorteilhaft sind weniger Versuche in der WireSense Version, aber bei einer permanenten Korrektur kann die Bauteilhöhe abweichen minimal abweichen. Der Siemens Ansatz dagegen ist genauer, erfordert aber deutlich mehr Vorversuche. Eine sinnvolle Lösung wäre ein adaptives Slicen, was im Rahmen des Projekts aufwandsbedingt nicht realisiert werden konnte. Da die Bahnplanung am IAPT primär mit Siemens NX erfolgte, und Siemens auch stark in der Demonstratoraufbereitung unterstützte, wurde einstimmig beschlossen, die Höhenkorrektur von Siemens zu verwenden.

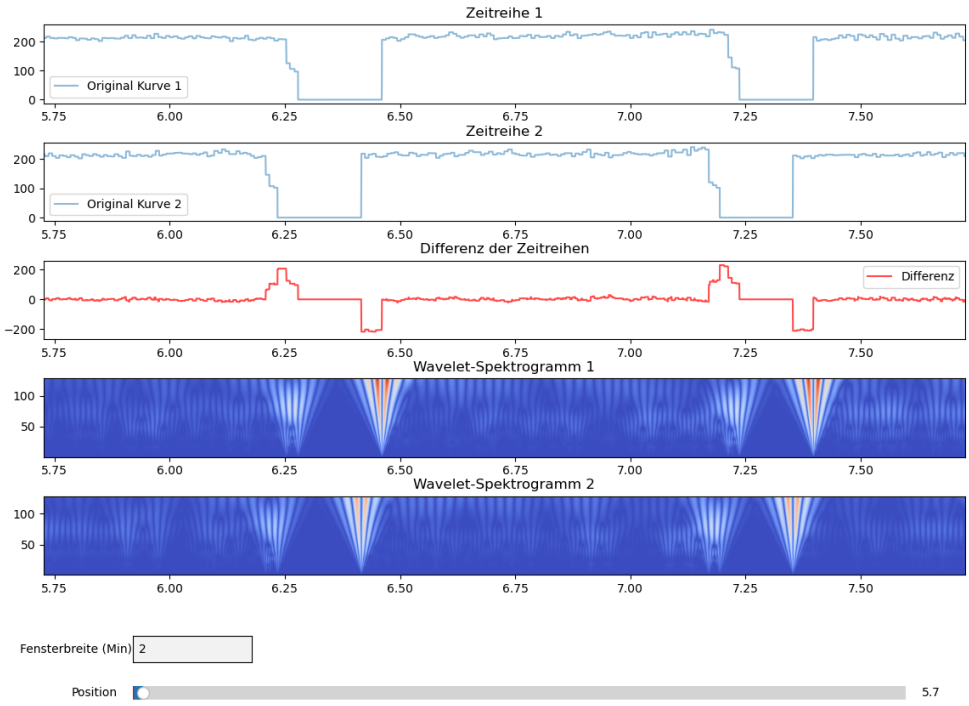
Bei der Diagnostik von Sensordaten war die Detektion der richtigen Signalanteile sehr anspruchsvoll, um sinnvolle statistische Größen zu ermitteln. Nachfolgend ist beispielhaft die Detektion von Schwankungen aus Mäanderverfahrwegen gezeigt. Auf der linken Seite, ohne effektive Korrektur und rechts mit korrekten Signalanteilen.





Des Weiteren konnten durch derartige Signalaufbereitungen auch Vorgehensweisen entwickelt werden, die Zeitreihenvergleiche zulassen. Durch Differenzanalyse ließen sich nicht nur Ströme auswerten, sondern auch die Zeitzwischenräume, welche Aussagen zu Wartezeitenänderungen, Unterbrechungen, Abkühlverläufen uvm. ermöglichen.

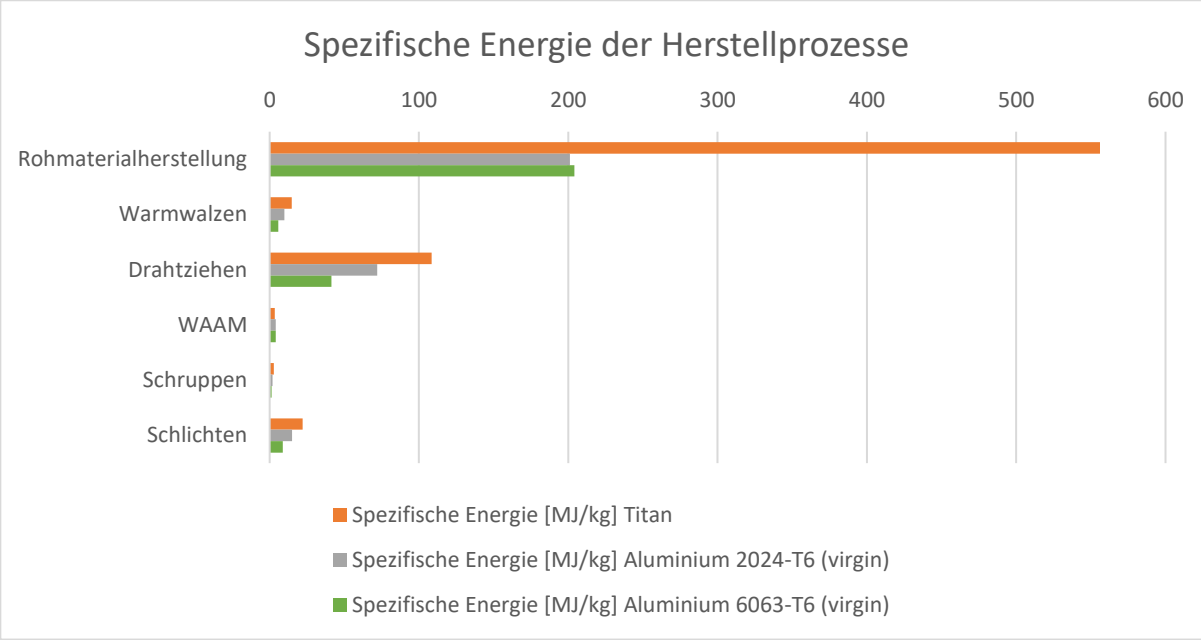
Durch diese Analysen ließen sich Einzelproben hinsichtlich ihrer Unterschiede per Segment, Layer, Nahtnummer usw. untersuchen und ermöglichten einen direkten Bauteilvergleich. Damit konnte eine Aussage getroffen werden, ob Bauteile wie ihre Qualifizierungsbauteile hergestellt wurden, oder ob es Abweichungen gegen die additive Fertigungsanweisung gegeben hat. Ein entsprechender Vergleich von zwei Kurven ist nachfolgend dargestellt.



Zusammengefasst ermöglicht diese Auswertung eine statistische Prozesskontrolle, wie sie in der Luft- und Raumfahrt über die ASTM E2587 - Standard Practice for Use of Control Charts in Statistical Process Control sowie der ISO 11462 Familie für die SPC-Implementation vorgegeben und angewendet wird.

AP 1.5 – Sensitivitäts- und Produktivitätsanalyse des AM-Prozesses mit und ohne Laserunterstützung

In diesem Arbeitspaket erfolgte der Vergleich der beiden Technologien WAAM und LLHAM. Dieser Vergleich wurde auf Wirtschaftlichkeits- und Nachhaltigkeitsniveau durchgeführt. Bei HEGGEMANN wurde die Nachhaltigkeit des WAAM-Prozesses betrachtet und anschließend energetisch mit dem LLHAM-Prozess vergleichen. Nachfolgend wird für eine typische WAAM-Prozesskette eine Aufstellung der energetischen Aufwände dargestellt. Die Kalkulation der WAAM-Anteile basieren auf eigenen Daten und wurden mit entsprechenden Veröffentlichungen abgeglichen. Alle weiteren Daten zu den weiteren Prozessen wurden der Ansys Granta Datenbank entnommen.



Die Aufwände für eine vergleichbare LLHAM-Prozesskette haben sich im Vergleich zu WAAM verändert. Während durch die energetisch höheren Aufwände des Laserbetriebs der Anteil an LLHAM um ca. 80% angestiegen ist, sind die Aufwände im Fräsen leicht um ca. 28% abgefallen, was der besseren Oberfläche und dem daraus resultierenden geringeren Aufmaß und späterem Materialabtrag geschuldet ist. Wie die Abbildung zeigt, sind die primären Einsparungen in der Nichtverwendung von Ressourcen der größte Hebel, was grundsätzlich je nach Werkstoff noch deutlicher für endkonturnahe Herstellverfahren sind. Je nach Werkstoff sind die Drahtziehaufwände je kg nicht unerheblich. Im Rohmaterial sowie im Drahtziehen liegen weitere Potentiale für weitere Forschungsarbeiten. Bei den Rohmaterialien könnte der Fokus auf Sekundärlegierungen liegen, beim Drahtziehen in der Festigkeit beim Ziehen. Wirtschaftlich ist die LLHAM-Anlage im direkten Vergleich mit einer WAAM-Plattform identischer Größe ca. doppelt so teuer. Die hybride Anlagentechnologie (Laser und Lichtbogen), Sicherheitsausstattung aufgrund des Lasers, Zusatzsensoren führen zu dieser Verdopplung des erforderlichen Investitionsbedarfs. Unter Berücksichtigung der gesamten Prozesskette, der zu erzielenden Materialqualität und der möglichen Auftragsraten bei zugleich sehr exakter Aufbaugeometrie ist das LLHAM-Verfahren jedoch wirtschaftlich attraktiv. Insbesondere, wenn der LLHAM Prozess in der zukünftigen Industrialisierung beweisen kann, dass er durch die zusätzliche Lasereinkopplung im Pulsmode die Festigkeit des zu erzeugenden Materials weiter steigern kann.

HAP 2 – Spanende Fertigbearbeitung

Im Hauptarbeitspaket HAP 2 wurde die spanende Fertigbearbeitung additiv hergestellter Halbzeuge untersucht, wobei aufgrund der unterschiedlichen Zerspanbarkeit separate Strategien für Titan und Aluminium entwickelt wurden.

Das IPMT entwickelte gemeinsam mit Fooke GmbH, Ceratizit Balzheim GmbH, dem IAPT und HEGGEMANN eine HPC-Frästechnologie für LLHAM-Halbzeuge aus Titan. Die Bearbeitungsstrategie berücksichtigte dabei folgende drei Besonderheiten:

1. AM-bedingte Eigenspannungen, die beim Materialabtrag zu Verformungen führen können,
2. Geometrieabweichungen durch den LLHAM-Prozess mit geringen Bearbeitungsaufmaßen sowie
3. zerspanungskraftbedingte Verformungen bei dünnwandigen Bauteilen.

Mittels einer adaptiven, mehrstufigen HPC-Frässtrategie zur wechselseitigen Bearbeitung wurden elastische Verformungen reduziert und Eigenspannungen sukzessive abgebaut. Die Prozessentwicklung umfasste auch die Fräswerkzeugoptimierung mit neuartigen Hochdruckinnenkühlung-Konzepten und Beschichtungen, um trotz der geringen Wärmeleitfähigkeit von Titan höhere Schnitt- und Vorschubgeschwindigkeiten zu ermöglichen.

AP 2.1 – Technologieentwicklung zum HPC-Fräsen von Titan auf Bearbeitungszentrum

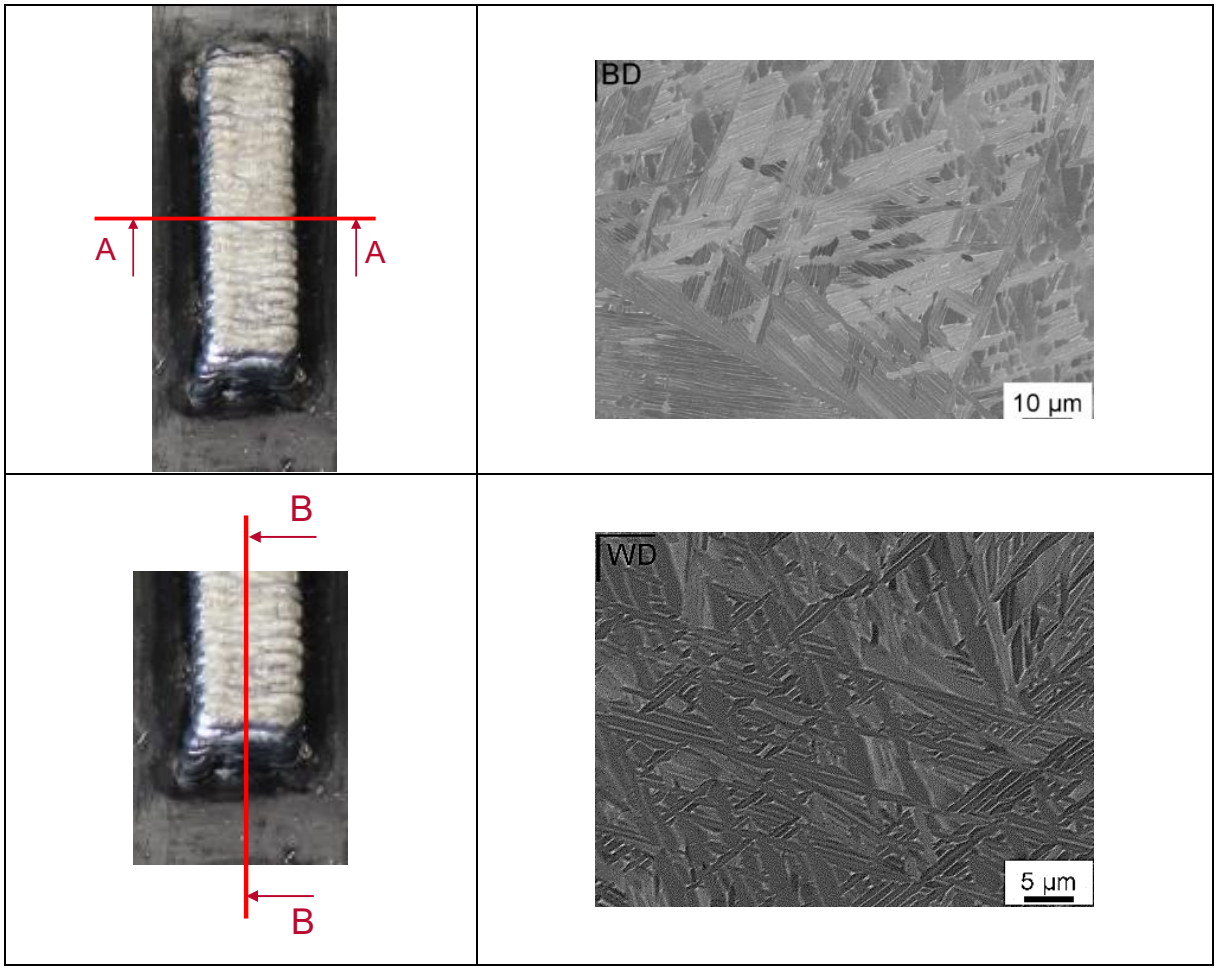
Als Lieferant in der Luft- und Raumfahrt müssen eingesetzte Fräsverfahren vor allem die Anwendbarkeit und die Toleranz von Bauteilen gewährleisten. Die Auswahl von Werkzeugen zum Erreichen von Oberflächenqualitäten sind dem Lieferanten freigestellt, insofern die verwendeten Medien (Kühlschmierstoffe) und Kontaktwerkstoffe von Werkzeug und Vorrichtung den vorgegebenen Regeln entsprechen (meist Kundenzulassung und Kundenvorgaben). Die Art der Werkzeugform und die Zerspanungsstrategie werden in der Regel wirtschaftlich und ökologisch betrachtet, wobei hier die Zerspanungsleistung einen hohen Stellewert besitzt, ebenso wie geringe Rüstzeiten und hohen Werkzeugstandzeiten.

Für die Herstellung typischer Titanbauteile sind mit den Partnern IPMT und Fooke Beispielbauteile definiert worden. Fokus der Entwicklungsarbeiten lag hierbei auf variablen und dünneren Stegen sowie auf größeren Bauteilen, deren Eigenspannung eine Deformation bedingen.

HEGGEMANN konnte hierzu die Entwicklungsarbeiten mit Know-How bzgl. möglicher Gefügeausbildungen bei Titanlegierungen unterstützen, wie sie bei WAAM auftreten und auch für LLHAM zu erwarten waren. Titanlegierungen wie Ti-6Al-4V bilden nach der Erstarrung und dem layerweisen Wiederaufschmelzen eine α-β-Matrix mit primären β-Körnern in Hauptwärmeleitrichtung zur Substratplatte. Bei schneller Abkühlung entstehen α-Lamellen, deren Morphologie von den Wärmehaltezeiten abhängt. Dünne Lamellen weisen höhere Festigkeiten auf, besitzen jedoch eine stärkere Lamellenkerbwirkung, während globulare Gefüge geringere Festigkeiten, aber bessere Risszähigkeiten zeigen.

Nach AMS 2380 - PPROVAL AND CONTROL OF PREMIUM-QUALITY TITANIUM ALLOYS sind α-Kolonien mit stark richtungsabhängigem Gefüge nicht zulässig. Die durchgeführten Untersuchungen zeigten keine α-Koloniebildung. Neben den primären β-Körnern, die als langgezogene Strukturen in Aufbaurichtung (BD - Building Direction) erscheinen, bilden sich entsprechend der Wärmeleitgradienten dominante Kornorientierungen aus. Diese Kornzonen an freien Oberflächen müssen beim Fräsen entfernt werden, was die erforderliche Wanddicke neben der natürlichen Rauigkeit der Schweißwülste zusätzlich beeinflusst.

Die Mikrostruktur zeigt richtungsabhängige Unterschiede zwischen BD (z-Richtung), siehe Schnitt A und WD (Welding Direction, x- oder y-Richtung) und Schnitt B in der folgenden Abbildung, wobei in WD eine verstärkte Lamellenbildung auftritt. Das Wiederaufschmelzen von Einzelbahnen ist schutzgasabhängig. Bei Argon bildet sich durch die Gaussverteilung der Energiedichte in der Lichtbogenmitte der sogenannte Argonfinger aus. Dies führt bei nebeneinander platzierten Einzelschweißnähten zu makroskopischen Inhomogenitäten, wobei tiefer liegende Wurzelbereiche nicht vollständig beseitigt werden.



Für die Fräsbearbeitung dünnwandiger Strukturen waren im Vergleich zu Knet- und Feingussbauteilen keine Parameteränderungen erforderlich, sodass Standardvorgaben empfohlen wurden. Bei geringerer Steifigkeit dominieren Schwingungseffekte, ohne dass metallurgisch bedingt höhere Fräszeiten notwendig wären.

AP 2.3 – Technologieentwicklung zum HSC-Fräsen von Aluminium mit hochgenauen CNC-Industrierobotern

In diesem Arbeitspaket wurden zu Beginn aus der Werkstoffauswahl in AP1.1 eine Übersicht erstellt. Diese wurde herangezogen um Zerspanungsparameter aus dem Zerspanungshandbuch und der Frässimulation zu ermitteln. Insbesondere gab es hierbei Austausch zur Fa. Racontech sowie Fooke bezüglich der Toleranzkonzepte realer Bauteile und Strukturen. Dies umfasste hauptsächlich Oberflächentoleranzen. Das Ergebnis war ein Bearbeitungskatalog (Übersicht) für die weiteren Untersuchungen von Racontec und Siemens. Als Ziel wurden Toleranzen von ±200 µm festgelegt.

Ein 6-Achs-Roboter besteht aus mehreren gekoppelten Massen (Motoren, Gelenke, Glieder) und elastischen Elementen (Antriebsstränge, Riemengetriebe, Gelenke). Diese bilden zusammen ein komplexes Mehrmassen-Feder-System mit charakteristischen Eigenfrequenzen.

Die elastischen Verbindungen entstehen z.B. durch:

- Riemengetriebe mit intrinsischer Nachgiebigkeit
- Gelenkelastizitäten in den Antriebssträngen
- Strukturelastizitäten der Roboterarme
- Lagerungen und Kupplungen zwischen den Achsen

Daraus ist leicht ersichtlich, dass eine Tolerierung an Bauteiloberfläche je nach Konfiguration dieses Zusammenspiels der genannten Komponenten zu einer anderen dynamischen Stabilität führt, wobei dieses Stabilitätsfenster auch gefunden werden musste.

HEGGEMANN unterstützte bei diesen Entwicklungsarbeiten mit den Erfahrungen der umfassenden Digitalisierung der eigenen WAAM-Zellen und erarbeitete gemeinsam mit den Partnern TUHH, Siemens und Racontec in mehreren Iterationsschleifen Lösungsansätze für die umfassende Prozessüberwachung.

Die umfangreichen Untersuchungen haben zudem gezeigt, dass z.B. Schnitt- und Vorschubgeschwindigkeiten an die Roboterdynamik anzupassen sind, um das optimale Zerspanungsergebnis zu erreichen. Möglicherweise kann zukünftig auch die Simulation von solchen mechanischen Feder-Masse-Systemen in der Bahnplanung berücksichtigt werden. Dies wäre insbesondere in der Siemens Softwareplattform aktuell darstellbar.

HAP 3 – Digitale Prozesskette

Das HAP 3 bildet die Verknüpfung der Einzelprozesse LLHAM und Zerspanung in einer durchgehend digitalen Prozesskette basierend auf Softwarelösungen der Fa. Siemens.

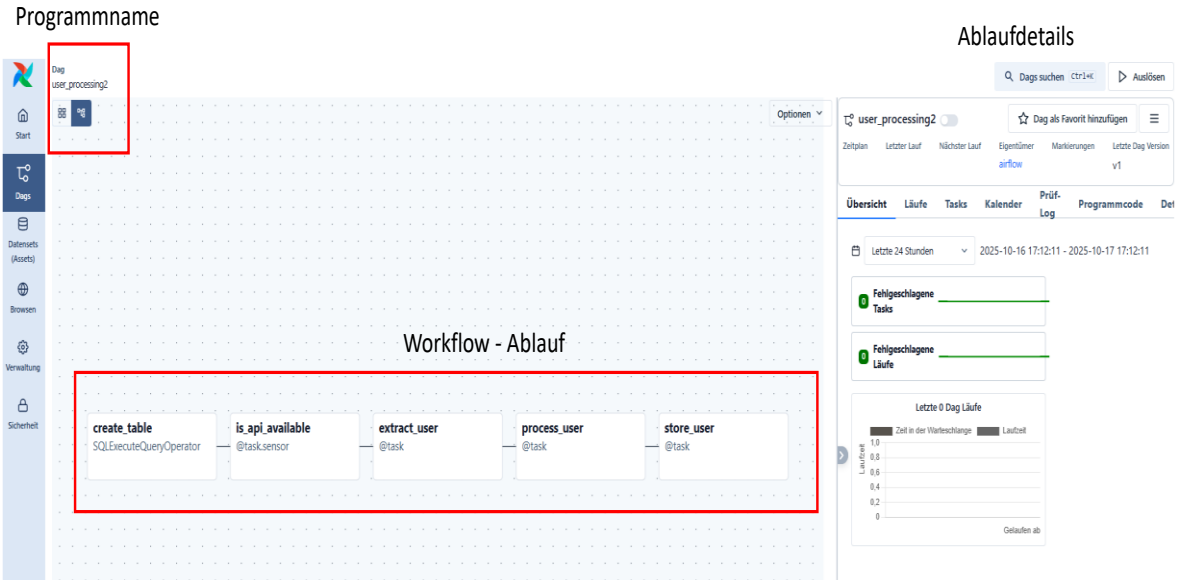
AP 3.1 – Entwicklung und Konzeptionierung der virtuellen Fertigungslinie

Bei der Entwicklung und Konzeptionierung der virtuellen Fertigungslinie ging es in diesem Arbeitspaket auch für weitere Prozesse entlang der Produktentstehungskette darum, alle qualitätsrelevanten Daten und Prozessparameter zu erfassen. Dafür wurden zunächst verschiedene Sensoren und Aktoren entlang der Prozesskette recherchiert und anschließend unter Berücksichtigung der Schnittstellenart, der Schnittstellenkommunikationsstandards und der erforderlichen Abtastrate definiert und erprobt. Ebenso war die Größe und das Format der anschließend zu speichernden Daten, Gegenstand der Entwicklungsarbeiten, da diese Daten gemäß Luftfahrtanforderungen 30 Jahre lesbar archiviert werden müssen.

HEGGEMANN hat sich dabei schwerpunktmäßig um die digitale Integration gekümmert, welche zu Beginn in der Integration von Stromabnehmen an Anlagenkomponenten bestand. Stromabnehmer eigenen sich insofern, als das es im Projekt möglich wurde Stromkurven und Leistungskurven von Bauteilen zu vergleichen und zu erkennen, dass sich diese für viele Untersuchungen eignen. Mit dem physikalischen Background lassen sich physikalische Größen aus den Stromkurven rekonstruieren, zeitliche Abläufe aufdecken und sogar wirtschaftliche und ökologische Betrachtungen für Prozessketten erstellen.

Auch wurde von HEGGEMANN die Verwendung einer digitalen Laufkarte mit allen erforderlichen Informationen für die einzelnen Prozessschritte für die papierlose Fertigung von LLHAM-Bauteilen betrachtet. Dadurch sollte es später möglich werden, die gesammelten Daten zu einer digitalen Produktakte zusammen zu führen.

Ebenso hat HEGGEMANN in diesem Arbeitspaket das Zusammenführen aller Daten mittels Apache Airflow mitentwickelt. Hiermit lassen sich lokal oder auf Servern/Workstations Skripte automatisiert ausführen, in der Regel sind das Batch- oder Pythonskripte, aber auch performante Sprachen, wie Rust, C oder Go können als ausführbare Binaries in Airflow Tasks über BashOperator oder PythonOperator gestartet werden. Diese Lösung ist komplett OpenSource und kann im Docker Container betrieben werden. Es wurden zudem externe Triggermöglichkeiten aus n8n identifiziert, ein modernes Workflowtool oder Flowise von Flowise.ai zum Verschicken von Informationen und Statusmeldungen quasi in Echtzeit aus dem LLHAM-Prozess per Whatsapp oder Telegram. Schematisch ist dieser Workflow in der folgenden Abbildung einmal dargestellt.



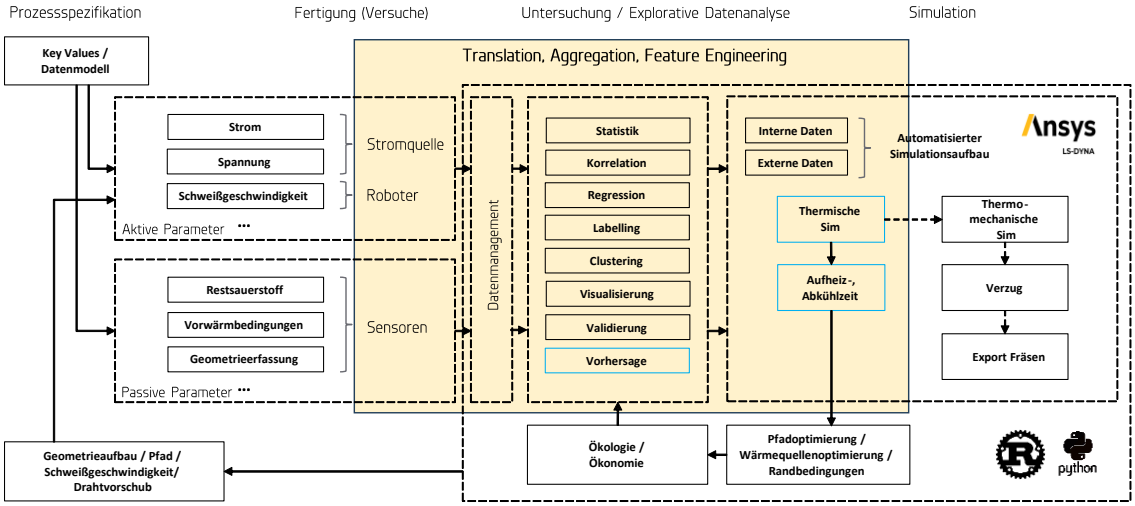
Die Workflows selbst können dabei auch verschachtelt sein, allerdings mit einer unidirektionalen Ausrichtung, wie die Bezeichnung DAG (Directed Acyclic Graph) bereits aussagt. Außerdem wurde es im Projekt als ein Batch-Tool verwendet, also zur nachgelagerten Datenverarbeitung. Ebenfalls eignen sich Dashboards, wie beispielsweise Grafana sehr gut für eine direkte oder nachgelagerte Detailanalyse, allerdings ist bei Prozessketten diese Art der Auswertung begrenzt gewesen, weil die Prozesse zeitlich nicht zusammenhängen, sondern nachgelagert stattfinden.

HEGGEMANN hat sich zusätzlich auch mit dem Daten-Ökosystem beschäftigt, um eine moderne Unternehmensarchitektur als Verwertung abzuleiten und in Kategorien von Data Engineering zu arbeiten. Dies geschah vor allem, um Daten aus Fertigungsprozessen mit Unternehmensdaten zu verbinden. Neben der virtuellen Prozesskette für Daten hat sich HEGGEMANN mit der thermo-mechanischen Simulation beschäftigt und diese mit dem IAPT für LLHAM durchgeführt. Die ausführlichere Darstellung dieser Entwicklungsarbeiten erfolgt in AP 3.3. Dies resultiert aus Zeitgründen, da durch die zeitlich verzögerten Versuchsdurchführungen beschlossen wurde, die statischen Versuche aus HAP4 und HAP5 direkt durch den Projektpartner IAPT ausführen zu lassen. Im Gegenzug hat HEGGEMANN zur möglichst optimalen Nutzung der Personalkapazität dafür den Simulationsanteil übernommen und entsprechende Lösungsansätze entwickelt und gemeinsam mit dem Partner IAPT validiert.

AP 3.3 – Simulation der AM- und Zerspanungsprozesse

Der Fokus der Entwicklungsarbeiten von HEGGEMANN bei der Prozesssimulation lag auf der thermo-mechanischen Simulation des Prozesses unter Verwendung von Softwarepaketen von ANSYS.

Diese Simulationen waren Teil des nachfolgend dargestellten komplexen Digitalen Prozesszwillings am Beispiel des WAAM-Prozesses. Er verbindet sowohl die Datenseite mit der virtuellen Seite und bietet Validierungsoptionen.

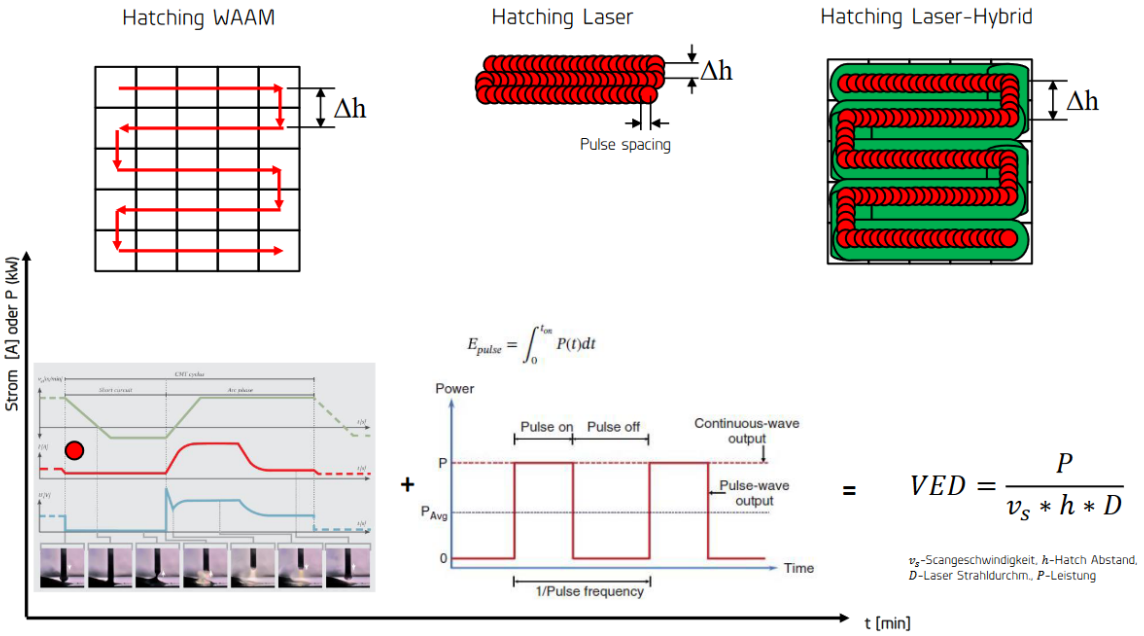


Wie in HAP 1 erarbeitet, wurde auf der Datenerfassungsseite eine umfassende Matrix für WAAM und die Laserkomponente entwickelt. Diese Matrix unterscheidet zwischen aktiven Parametern, die den Prozess direkt beschreiben, und passiven Parametern, die entweder berechnet oder aus der Umgebung des Build-Jobs abgeleitet werden.

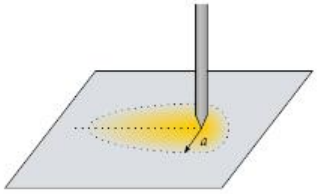
Daten durchlaufen in der Regel komplexe Verarbeitungspipelines, deren Gestaltung je nach Verwendungszweck variiert. Während die Möglichkeiten grundsätzlich unbegrenzt sind, lassen sich häufig wiederkehrende Verarbeitungsschritte identifizieren (in der Darstellung gelb markiert). Im Anschluss an die Verarbeitung finden die Daten vielfältige Verwendung: als Eingangsdaten für KI-Modelle in der Produktion, als Eingangsparameter für Simulationen oder als Berichtsinhalte in archivierbaren Datencontainern, die auch im Rahmen digitaler Geschäftsmodelle als Mehrwertleistung an Kunden bereitgestellt werden können.

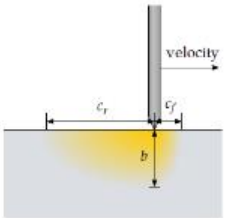
Im Projekt wurde konkret mit der Software LS-Dyna gearbeitet. Die Auswahl dieser „Multiphysics Software“ begründet sich primär durch ihre Flexibilität: Sämtliche Funktionen außerhalb des Solvers können programmiert werden, zudem ermöglicht sie die multidisziplinäre Durchführung impliziter und expliziter Berechnungen. Bis heute existiert keine vergleichbare Simulationslösung mit diesem Funktionsumfang. Eine Evaluierung von ANSYS Additive als Softwarealternative ergab, dass diese Lösung für WAAM und ähnliche Prozesse derzeit noch keine ausreichende Prozessabbildung bietet. Im Projektzeitraum wurden zudem die Python-Schnittstellen PyAnsys und PyDyna untersucht, die sich als sehr geeignet für die Automatisierung von Simulationsaufbau und -berechnung, die Erstellung automatischer Reports sowie die Kopplung mehrerer Teilsimulationen erwiesen.

Ein Hauptziel lag in der Zusammenführung der beiden Wärmequelle. Da für die Qualitätsauswertung die eingebrachte Volumenenergie von großer Bedeutung ist, wurde das Modell unter Berücksichtigung der hybriden Energiequellen mit entsprechend volumetrischer Streckenenergie aufgebaut, wie nachfolgend bildlich dargestellt.

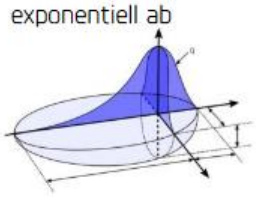


Die Validierung der geometrischen Ausprägung wurde anhand von Makroschliffen durchgeführt. Die Parameter Nahtbreite, -höhe, Einbrandtiefe und -gestalt ermöglichten die Bestimmung von Modellparametern und Rückschlüssen für die Simulationsrandbedingungen. Die entwickelten Modelle unterscheiden sich für Laser- und WAAM-Prozesse aufgrund unterschiedlicher Energiedichten, Leistungen und Geschwindigkeiten. Das Schutzgas (Argon) beeinflusst nachweislich die Energieverteilung und wurde dementsprechend auch simulativ berücksichtigt. Verschiedene Wärmequellenarten wurden als Ersatzmodelle für das Laser-Hybrid-Schweißen implementiert. Für die Simulation wurden IFORM 1 und IFORM 3 als passende geometrische Ausprägungen der Energiequellen in LS-Dyna verwendet. Die unterschiedlichen Einwirkungen in das Material bei diesen zwei Varianten sind in der folgenden Abbildung anschaulich dargestellt.



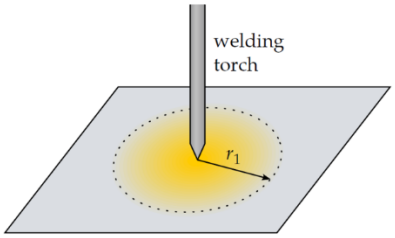


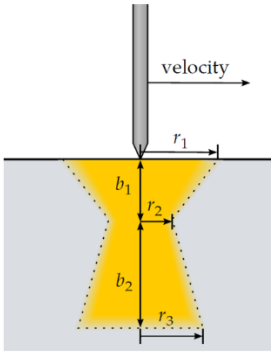
IFORM = 1	IFORM = 2
• Gleiche doppelellipsoide Geometrie • Leistungsdichte nimmt mit Entfernung exponentiell ab	• Gleiche doppelellipsoide Geometrie • Leistungsdichte im gesamten Bereich konstant



$$q = \frac{2n\sqrt{n}FQ}{\pi\sqrt{\pi}abc}\exp\left(\frac{-nx^2}{a^2}\right)\exp\left(\frac{-ny^2}{b^2}\right)\exp\left(\frac{-nz^2}{c^2}\right)$$

$$q = \frac{3FQ}{2\pi abc}$$





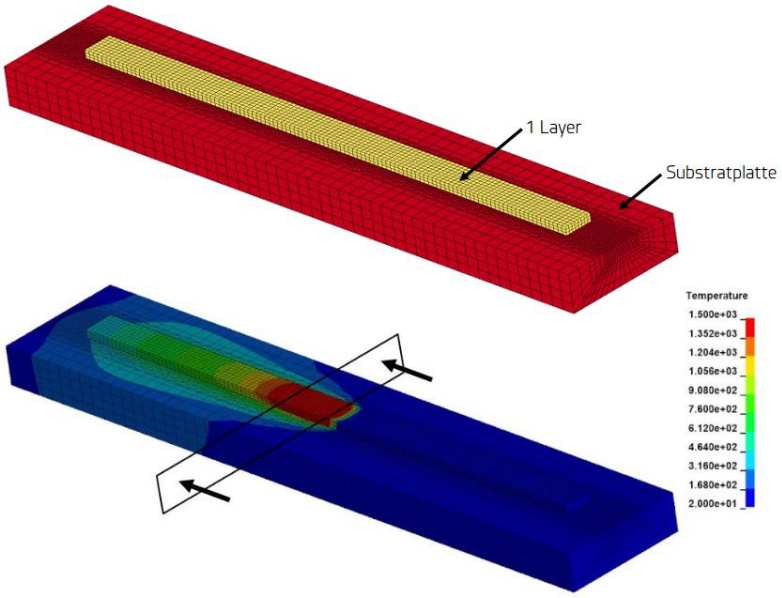
IFORM = 3

- Doppelkonische Geometrie
- Leistungsdichte konstant

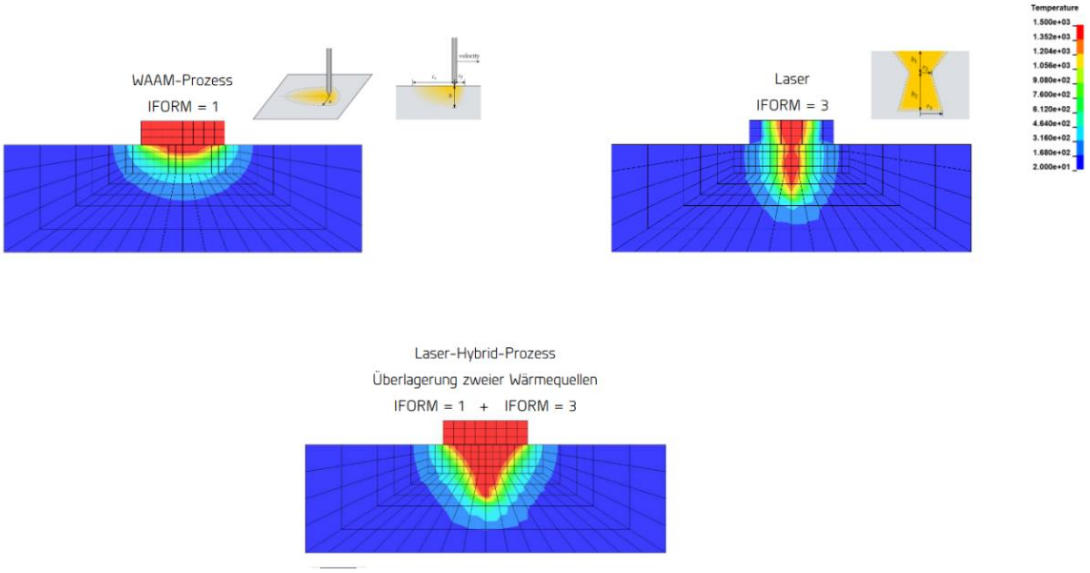
$$q_i = \frac{3F_iQ}{2\pi b_i(r_i^2 + r_{i+1}^2 + r_i^2 r_{i+1}^2)}, \qquad i = 1,2$$

Die Beschreibung der Materialeigenschaften ist bei dieser Simulationsmethodik sehr umfangreich und alle Parameter sind temperaturabhängig. Kennwerte sind oberhalb von 850°C aus der Literatur nur schwer zu recherchieren. HEGGEMANN profitiert hierbei auch von Arbeitsergebnissen früherer Innovationsprojekte zur Warmumformung von Ti-6Al-4V bei Temperaturen

bis 1.000 °C. Entsprechende Werte bei höheren Temperaturen wurden zudem in wissenschaftlichen Arbeiten recherchiert und im Rahmen der Entwicklungsarbeiten in diesem Arbeitspaket mittels JMatPro extrapoliert. Die folgenden beiden Abbildungen zeigen exemplarisch einige Screenshots durchgeführter Simulationen. Zunächst ist der Aufbau einer Lage mit hybrider



In dieser Konfiguration wurden die einzelnen und die kombinierte Wärmequelle simuliert. Die jeweilige Wärmeverteilung der Einzelprozesse und des Hybridprozesses in die Substratgrundplatten ist nachfolgend in den Schnittdarstellungen anhand der Temperaturverteilungen veranschaulicht.



Durch die Möglichkeit der Simulation konnten im Projekt wichtige Eigenschaften, wie thermische Gradienten in der Abkühlung bestimmt und Verzug für die Lagerung berücksichtigt werden.

HAP 4 - Zusammenführung in Fertigungszelle & Validierung

AP 4.3 – Validierung der entwickelten Prozesse an Funktionsmustern von Großstrukturen

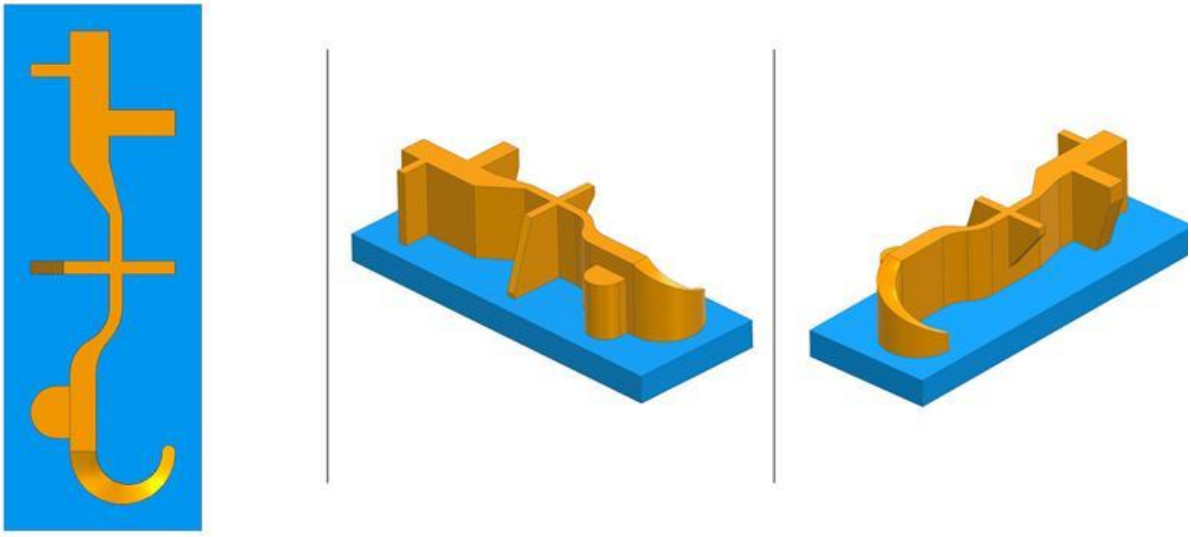
Die Validierung der entwickelten Prozesse sowie der Simulation wurden anhand von Versuchsreihen bei Siemens in München und dem IAPT in Hamburg durchgeführt und von HEGGEMANN unterstützt und begleitet. Hierbei wurden zuvor im Projekt Festlegungen für Geometrien, Wandstärken und auch für komplexere H-förmige Proben gelegt, welche in Abstimmung mit Boeing von HEGGEMANN konstruiert und zur Verfügung gestellt wurden. Da sich die Fertigstellung und Inbetriebnahme der LLHAM-Zelle am IAPT zeitlich im Projekt verzögert hatte, wurde beschlossen, die Präparation und Auswertung der Titanprobenkörper auch IAPT zu machen, da HEGGEMANN parallel viel Aufwand in die thermo-mechanische Simulation investierte.

Die Festlegung der Probekörper für Siemens erfolgte frühzeitiger. Diese Probengeometrien wurden aus Gründen der zeitlichen Effizienz später auch 1:1 in der Anlage beim IAPT verwendet. Dadurch konnte der Postprozess von Siemens auf die Anlage des IAPT übertragen werden. Somit konnte die Entwicklungszeit verkürzt und der Postprozess vor Projektende noch abgestimmt werden. Die Untersuchung des IAPT an Wandprobekörpern und Einzelnähten sowie die Datenaufzeichnung von Siemens wurde mit den Parametern aus HAP1 synchronisiert, Beispielauswertungen implementiert und den Partnern vorgestellt. Das Konsortium hatte sich für einen Stand des DLRs zum Luftfahrtforschungsprogramms auf der ILA 2026 beworben und ist auch angenommen worden. Der Demonstrator von Siemens und dem IAPT wurde dafür als Ausstellungsstück akzeptiert.

Die Geometrien des Technologiedemonstrators enthalten dabei die folgenden Features:

- Unterschiedliche Wandstärken – Wanddickenunterschiede stehen für Steifigkeitsänderung und thermische Herausforderungen, insbesondere thermische Historie und Verzug, aber auch linienförmige sowie mäanderförmige Bauweisen wurden dadurch repräsentiert
- Komplexe mehrachsige Strukturen zeigten Prozessgrenzen auf, Hinterschnitte, Hohlräume, Umfang- und Füllstrategien wurden von Siemens ausgewertet und die Ergebnisse im Konsortium besprochen
- Die Abmessungen des Demonstrators erinnert an ein typisches Strukturbauteil und stellt somit eine bewertbare Endstruktur dar
- Das IPMT konnte die Fräskompensation testen sowie Siemens die virtuellen Vorhersagen aus der Bahnplanung
- Integration von In-Situ Messungen der in HAP1 festgelegten Sensoren und Infrastruktur sowie auch Fräsparameter durch das IPMT

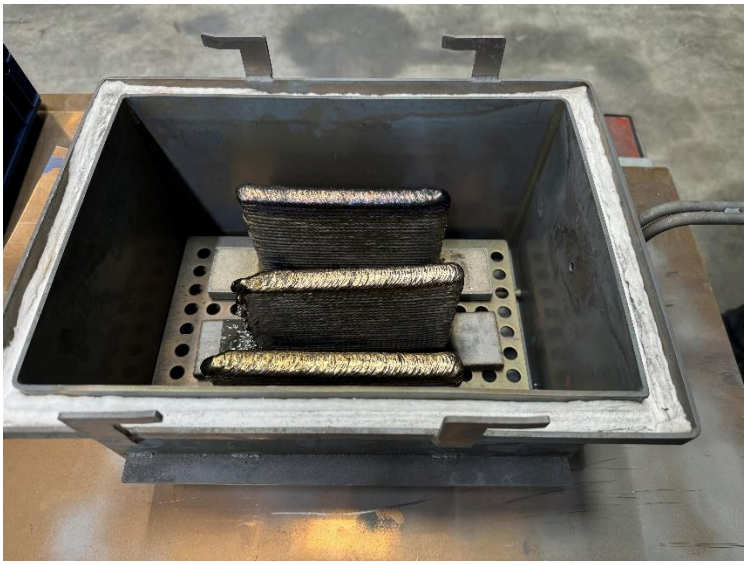
Nachfolgend ist die komplexe Struktur abgebildet, links eine Draufsicht und Mitte/rechts zwei Ansichten, während die Stege links und rechts vom Mittelsteg teilweise Hinterschnitte aufweisen. Die Grundplatte ist 500 mm lang und 200 mm breit. Die Höhe der zu erzeugenden auf der Grundplatte liegt bei ca. 100 mm.



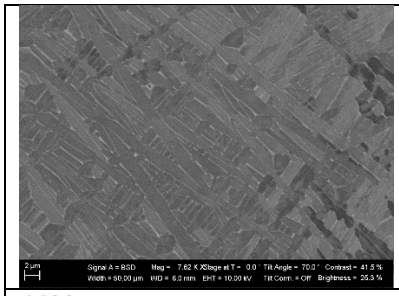
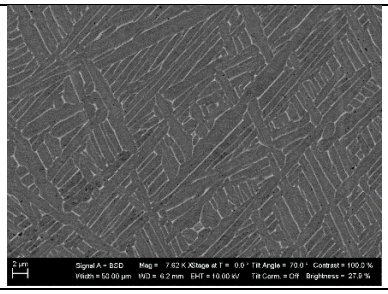
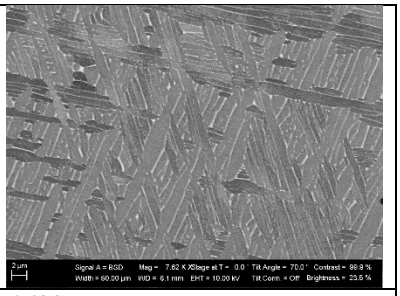
Die komplexe Bahnplanung wurde von Siemens in mehreren Iterationen realisiert und an Bauteilausschnitten erfolgreich erprobt. Zerstörende Materialprüfungen finden für diese Geometrien nicht mehr statt, da diese an Testmustern im Vorfeld durchgeführt worden.

Die Strukturierung der Nachhaltigkeitsbetrachtung in AP 1.5 waren auch Basis für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen. Es konnte gezeigt werden, dass die Nachhaltigkeitsbetrachtung eng an die Wirtschaftlichkeit gekoppelt ist. Der energetische Mehraufwand aufgrund des verringerten Wirkungsgrads beim LLHAM-Prozess sowie der hybride Prozess mit zwei Energiequellen sind entsprechend teurer als der WAAM-Prozess im direkten Vergleich. Durch eine verbesserte BTF-Ratio bei Bauteilen aus dem LLHAM-Prozess aufgrund der besseren Oberflächenrauhigkeit und damit einhergehend weniger Aufmaß konnte dieser Nachteil z.T. kompensiert werden. Dieser Effekt ist bauteilabhängig und geometrieabhängig und kann aus diesem Grund nicht generell quantifiziert werden.

Bei den vergleichenden Untersuchungen von drei geschweißten Probenkörpern (hergestellt beim IAPT), konnte die deutlich erhöhte Materialfestigkeit aus zerstörenden Prüfungen von 6 bis 10% in mikrostrukturellen Analysen nicht nachgewiesen werden. Weiterführend vertiefende werkstofftechnische Untersuchungen zu diesem Thema wurden im Projekt mangels Zeit und Budget nicht durchgeführt und stellen somit eine weitere wissenschaftliche Anschlussfähigkeit dar. Nachfolgend ist ein Foto der erzeugten Titanprobenkörper in der Wärmebehandlungsbox dargestellt. Die Wärmebehandlung wurde bei HEGGEMANN nach den Erkenntnissen aus AP 1.3 mit Parametern der AMS 4911, bei 732°C für 2h durchgeführt.



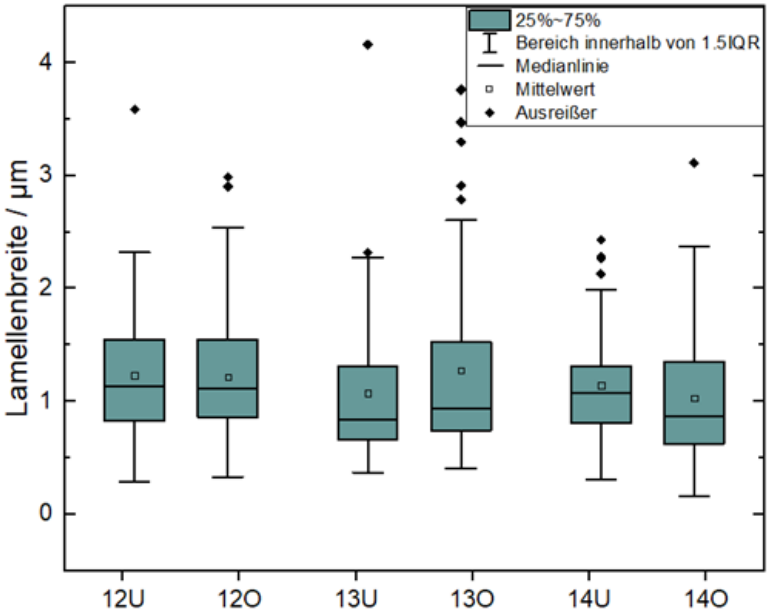
Es wurden final 3 Wände untersucht, bei denen jeweils 2 Bereiche für Mikrostrukturuntersuchungen entnommen wurden und einer Untersuchung der α-Lamellenbreite und Verteilung der α-β-Struktur im REM untersucht wurde. Dies geschah unter anderem deswegen, weil sich das primäre β-Korn über mehrere Layer erstreckt hat und so keine klare Auswertung der Korngröße zuließ. Nachfolgend sind die Gefügebilder aller 3 Wände für den unteren Bereich zu sehen, sie weisen ein typisches Basketwave Gefüge auf. Diese Gefügeart ist typisch und gewünscht, da α-Kollonien unzulässig sind, wie in AP 1.3 herausgearbeitet wurde.

		
12U	13U	14U

Das Ergebnis ist demzufolge sehr gut und bestätigt die hohe Qualität des entwickelten Prozesses.

Die nachfolgende Abbildung zeigt die Ergebnisse von drei Proben aus unterschiedlichen Prozessvarianten wie folgt:

- Probe 14 aus WAAM-Prozess (Lichtbogen ohne Laser)
- Wand, 13 LLHAM ohne Puls (cw) (Lichtbogen und Laser)
- 12 LLHAM gepulst (Lichtbogen und Laser mit geringerem Energieeintrag)



Trotz einiger Ausreißer zeigten die Proben keine signifikant unterschiedliche Lamellenbreite. Dies ist nicht negativ zu werten, da für LLHAM zunächst angenommen wurde, dass durch den überlagerten Laser sogar ein gegenläufiger Effekt auftreten könnte. Somit konnte in allen Versuchsreihen keine Verschlechterung des Mikrogefügeaufbaus festgestellt werden.

Abschließend wurde der entwickelte Prozess von den Partnern hinsichtlich des erreichten Technologiereifegrads (TRL) bewertet. Federführend waren hierbei Siemens und HEGGEMANN, da beide Unternehmen aus unterschiedlichen Perspektiven und Anwendungen viel Erfahrung in der Industrialisierung von Fertigungsprozessen haben. Im Ergebnis unterscheiden sich die erreichten TRLs in den beiden untersuchten und erprobten Werkstoffklassen wie folgt:

Der bei Siemens demonstrierte Prozess mit Aluminium hat nach Prüfung in relevanter Laborumgebung die Kriterien für TRL 6 aus Sicht des Konsortiums erfüllt. Da die Fertigungszelle bei Siemens technologisch einer Serienanlage entspricht (ähnlicher Aufbau, wie auch bei HEGGEMANN) und die erzielten Ergebnisse materialtechnisch den Anforderungen erfüllen.

Bei dem Projektpartner IAPT wird erst nach Beendigung des Projektes die finale Umsetzung im realitätsnahen Einsatzfeld (Laborumgebung) stattfinden. Zum Projektende beurteilen die Projektpartner den erreichten Reifegrad mit TRL 5, da insbesondere auch bei Titanlegierungen weitere Anforderungen hinsichtlich einer nahezu sauerstofffreien Umgebungsatmosphäre erforderlich. TRL 6 ist aber nach einstimmiger Meinung im Projektverbund auch für diese LLHAM-Anlage in Verbindung mit Titan erreichbar.

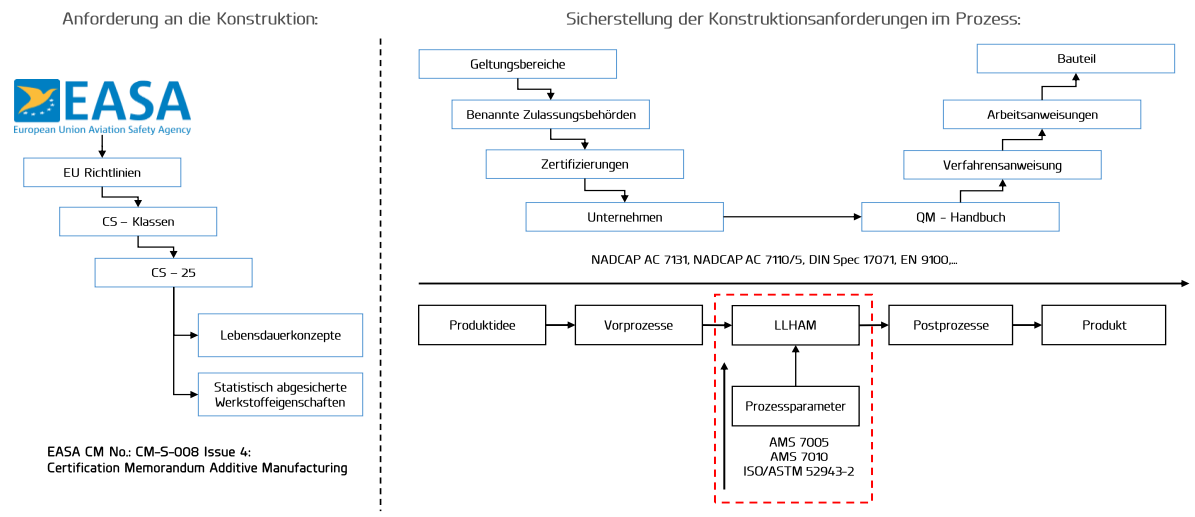
Zusammenfassend wurde der entwickelte und an zwei Standorten erfolgreich erprobte LLHAM-Prozess im Projektverbund einstimmig als ein sehr gutes Projektergebnis eingeschätzt, so dass auch einer Weiterentwicklung und einer darauffolgenden Industrialisierung nichts im Wege steht. Somit sind die Verwertungsperspektiven für eine wirtschaftliche Verwertung nach wie vor sehr erfolgversprechend und auch eine wissenschaftliche Anschlussfähigkeit konnte bei dem ein oder anderen Sachverhalt aufgezeigt werden.

HAP 5 – Qualifizierung von Aluminium/Titan

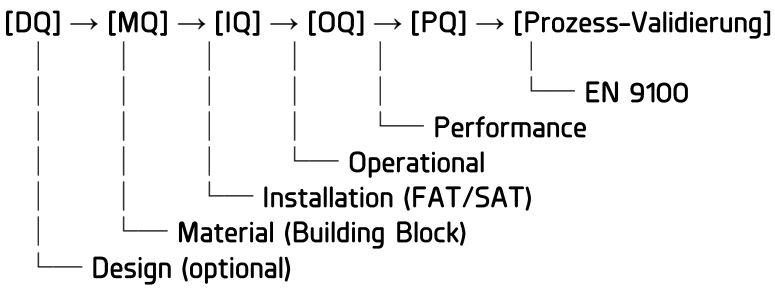
Der ursprüngliche Projektantrag, der zunächst auf eine Anwendung bei Aircraft Philip in Übersee ausgerichtet war, erfuhr mit der Projektübernahme durch HEGGEMANN eine inhaltliche Neuausrichtung hinsichtlich der Verwertungsperspektive und der praktischen Anwendung der im Projekt erzielten Ergebnisse. Im Einvernehmen beschloss das Konsortium, den Schwerpunkt auf die Qualifizierung von Titan zu legen, da sich insbesondere bei der Legierung Ti-6Al-4V die ausgeprägtesten strukturellen Effekte zeigten. Abweichend von der ursprünglichen Verbundbeschreibung wurde zudem bei den Aluminiumlegierungen nicht die 2000er-, sondern die 6000er-Legierungsklasse in den Fokus gerückt, da diese – insbesondere in nanolegierten Varianten – eine kostengünstigere Alternative zu den Legierungen EN-AW 2319 und EN-AW 2024 bietet. Andere Themen, wie das eigentliche Anlagenkonzept, oder die Ableitung von Lasten- und Pflichtenheft sind eher prozessspezifisch und blieben auch mit dem Einstieg von HEGGEMANN in das Projekt unverändert.

AP 5.1 - Anforderungen an die Qualifizierung

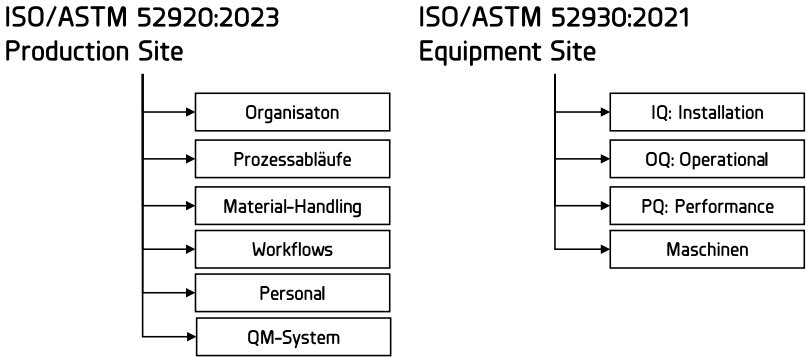
Die Qualifizierung eines Prozesses aus Unternehmenssicht bedarf die Eingliederung in die regulatorische Struktur eines Geltungsbereiches, in unserem Fall der Luft- und Raumfahrt. Die Unternehmenszertifizierung basiert in Deutschland auf der DIN EN 9100 Reihe, die wiederum auf der ISO 9001 basiert, aber erweiterte Kriterien reguliert, wie beispielsweise Nachverfolgbarkeit oder Risikomanagement. Solche Normen regeln keine technischen Details, wie das Schweißen oder die additive Fertigung, weshalb hier aus den Fachrichtungen organisierte Qualifizierungen vorausgesetzt werden. In Deutschland ist das die DIN EN ISO 3834, eine internationale Normenreihe, welche die Qualitätsanforderungen beim Schmelzschweißen von metallischen Werkstoffen festlegt. Sie dient als Grundlage für die Qualitätssicherung in schweißtechnischen Betrieben und ist zentral für Unternehmen, die Schweißarbeiten an sicherheitsrelevanten oder hochbelasteten Bauteilen ausführen. Für die Entwicklung des LLHAM-Prozesses wurden hieraus die entsprechenden Anforderungen abgeleitet. Für den reinen WAAM-Prozess hat HEGGEMANN hierzu bereits das V-Modell aufgebaut, welches im Projekt auf LLHAM wie nachfolgend dargestellt erweitert werden konnte.



Dieses Modell hilft bei der Veranschaulichung der Anforderungen für ein Build-to-Print Unternehmen bzgl. der Entwicklung und Qualifizierung eines Schweißprozesses, wie dem LLHAM. Bereits im Arbeitspaket 1.1 wurde deutlich, dass sich für LLHAM auf Prozessebene eine Vielzahl einschlägiger Normen ergeben hat (rot gestrichelt dargestellt). Im Folgenden soll der Referenzrahmen näher erläutert werden, der den betrachteten Prozess kontextuell einbettet. Zu Beginn des Projekts bezogen sich die maßgeblichen Randbedingungen ausschließlich auf Normen, welche die Zusammenstellung der Komponenten innerhalb der am IAPT eingesetzten Zelle definierten. Mit der fortschreitenden Etablierung der Normenreihe DIN EN ISO/ASTM 52900 im weiteren Projektverlauf wurde daraufhin eine umfassende Anforderungsliste (Requirementsliste) gemäß dieser Normenreihe sowie in Übereinstimmung mit dem EASA CM–S–008 Issue 4 – Certification Memorandum Additive Manufacturing erstellt.



Die einzelnen Schritte der Prozessvalidierung wurden gemäß den Anforderungen zweier Normen durchgeführt: der DIN EN ISO/ASTM 52920 „Additive Fertigung – Grundsätze der Qualifizierung – Anforderungen an industrielle additive Fertigungsverfahren und Produktionsstätten" sowie der DIN EN ISO/ASTM 52930 „Additive Fertigung – Grundlagen der Qualifizierung – Installation, Funktion und Leistung (IQ/OQ/PQ) von PBF-LB-Anlagen". Letztere wurde dabei sinngemäß angewendet.



Auf Grundlage der zuvor beschriebenen Struktur erfolgte die Erstellung einer Anforderungsübersicht (Requirement Overview) auf Basis eines Lastenheftes in den folgenden vier Phasen.

Phase 1:
Der Prozess begann mit einer umfassenden Normenrecherche. Dabei wurden zunächst alle relevanten Standards identifiziert, darunter das EASA CM-S-008 Issue 4 als luftfahrtspezifisches Dokument für Additive Manufacturing, die ISO/ASTM 52930:2021 zur Qualifizierung von Anlagen (IQ/OQ/PQ) sowie die ISO/ASTM 52920:2023 für Anforderungen an Produktionsstätten. Ergänzend wurden Normen und Richtlinien aus den Bereichen Lasersicherheit (DIN EN ISO 22827), Schweißtechnik (AWS D17.1, IEC 60974-14) sowie Arbeitsschutz (DGUV, TRGS) analysiert. Ein wesentlicher Erkenntnisgewinn bestand in der klaren Unterscheidung zwischen ISO/ASTM 52930 (Qualifizierung von Maschinen und Anlagen) und ISO/ASTM 52920 (Anforderungen auf Betriebsebene).

Phase 2:
Basierend auf der Normenanalyse wurden Anforderungskategorien definiert und jeweils mit einem eindeutigen Präfix versehen (z. B. DQ, MQ, SITE, IQ, OQ, PQ, LASER, LLHAM, CNC, SAFETY, AW). Die Kategorien wurden entsprechend der logischen Prozessabfolge angeordnet – beginnend mit dem Design, gefolgt von der Materialqualifizierung, dem Produktionsstätten-Setup, der Installation des Equipments sowie dem abschließenden Performance-Nachweis.

Phase 3:
Für jede Kategorie wurden spezifische Anforderungen gemäß einer einheitlichen Systematik dokumentiert. Jede Anforderung wurde mit folgenden Attributen versehen:

- REQ-ID: eindeutige Kennung
- Beschreibung: zu erfüllende Anforderung
- Normative Basis: zugehörige Norm oder Richtlinie
- Verifikationsmethode: Nachweisverfahren zur Prüfung der Erfüllung
- Verantwortlichkeit: zuständige Stelle oder Rolle
- Qualifizierungsphase: Zuordnung zu DQ, IQ, OQ, PQ oder SITE

Phase 4:
Anschließend wurde eine Traceability Matrix erstellt, in der die Anforderungen systematisch den folgenden Parametern zugeordnet wurden:

- Qualifizierungsphase
- Normative Basis
- Verifikationsmethode
- Status und Verantwortlichkeit

Zur Veranschaulichung werden im Folgenden exemplarisch zwei Requirement Cards aus der Design-Phase dargestellt.

REQ-DQ-001: User Requirements Specification (URS)	
Phase	DQ
Priorität	MUSS
Status	Abgeschlossen
Normative Basis	ISO/ASTM 52930 (Prerequisite), EN 9100, Kundenspezifikationen, Design Richtlinien (z.B. Handbuch der deutschen Luftfahrt)
Verifikationsmethode	User Requirements Specification
Verantwortlichkeit	Projektleitung + Prozessingenieur
Fälligkeit	Vor Systembeschaffung

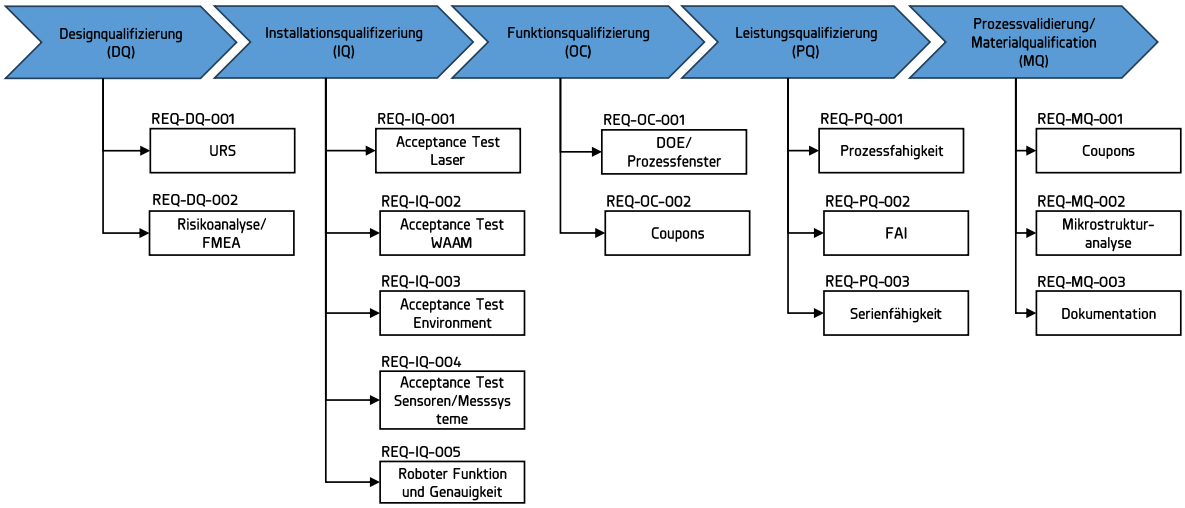
Die User Requirements Specification (URS) muss alle funktionalen und technischen Anforderungen an das LLHAM-System enthalten. Dazu zählen insbesondere das Produktspektrum, die verwendeten Materialien, die Bauteilgrößen, die erforderlichen Genauigkeiten, die Produktionskapazität sowie der Automatisierungsgrad. Daraus wird deutlich, dass diese Festlegungen vor der Beschaffung des Systems erfolgen müssen.

Die Betrachtung zeigt außerdem, dass die in HAP1 und HAP2 definierten Parameter zwar die Infrastruktur des Systems bestimmen, die Qualifizierungsgrößen oder die Validierung jedoch aus den spezifischen Anforderungen der Bauteile abgeleitet werden. So kann beispielsweise ein System vollständig qualifiziert sein, ein Bauteil mit einer Länge von 3 m jedoch dennoch zu groß für die Anlage sein. Zu Beginn des Projekts wurde daher vom Konsortium eine maximale Bauteilgröße von 1,2 m festgelegt.

Ein weiteres Beispiel ist die ebenfalls in der folgenden Abbildung dargestellte Material Qualification Card: Die für das LLHAM-System vorgesehenen Materialien müssen nach dem Building Block-Ansatz qualifiziert werden. Auf Level 1 (Coupon) ist vorgesehen, mindestens 100 Zugproben pro Material, Orientierung und Wärmebehandlung zu erstellen. Die statistische Auswertung erfolgt nach A-Basis/B-Basis gemäß MMPDS. Da eine vollständige Werkstoffqualifizierung nach MMPDS im Projektumfang nicht realisierbar war, wurde die Probenanzahl reduziert. Die Qualifizierungsaufstellung wurde jedoch vollständig durchlaufen, um sowohl den Projektpartnern einen Nutzen zu bieten als auch die Ergebnisse dokumentiert festzuhalten.

REQ-MQ-001: Material Qualification (MQ)	
Phase	MQ
Priorität	MUSS
Status	Abgeschlossen
Normative Basis	EASA CM-S-008 Issue 4, MMPDS, Kundenspezifikationen, Werkstoffhandbuch der deutschen Luftfahrt
Verifikationsmethode	Zugversuche, Härte, makroskopische und mikroskopische Auswertung, REM
Verantwortlichkeit	Materialprüfung + AP 5.2
Fälligkeit	Vor PQ

Abschließend wurden alle Erkenntnisse bzgl. der erforderlichen Prozessqualifizierungsschritte zusammengeführt und in dem nachfolgend dargestellten Ablaufdiagramm visualisiert.



Alle Schritte wurden für den LLHAM-Prozess durchlaufen und die entsprechenden Projektpartner für die Durchführung benannt. Die Anlage bei dem Partner IAPT durchlief die Qualifizierungsschritte erfolgreich, einzig das Arbeitsschutzkonzept wurde vom IAPT übernommen und nicht neu entwickelt, so dass keine Zusatzkosten entstanden.

AP 5.2 – Qualifizierungskonzept im Schwerpunkt Luftfahrt

Aus der Ablaufübersicht ergaben sich bereits indirekt eine Terminplanung sowie ein Maßnahmenplan, der die Verantwortlichkeiten für die Umsetzung festlegte. Der thematische Schwerpunkt „Luftfahrt“ wurde von Beginn an unmittelbar integriert. Die Parametrierung im Arbeitspaket (AP) 1.1 orientierte sich dabei an den Richtlinien der AMS 7005 und AMS 7010.

Das Hauptaugenmerk dieses Arbeitspakets lag auf der Untersuchung von Coupons, der Materialcharakterisierung sowie geometrischen Aspekten. Das Pflichtenheft wurde auf Grundlage der festgelegten Geometrien für die Versuchsreihen und Demonstratoren erstellt. Die zugrunde liegende Spezifikation wurde freundlicherweise von Boeing bereitgestellt, wodurch ein Abgleich des Pflichtenhefts mit dem Lastenheft des Bauteils ermöglicht wurde.

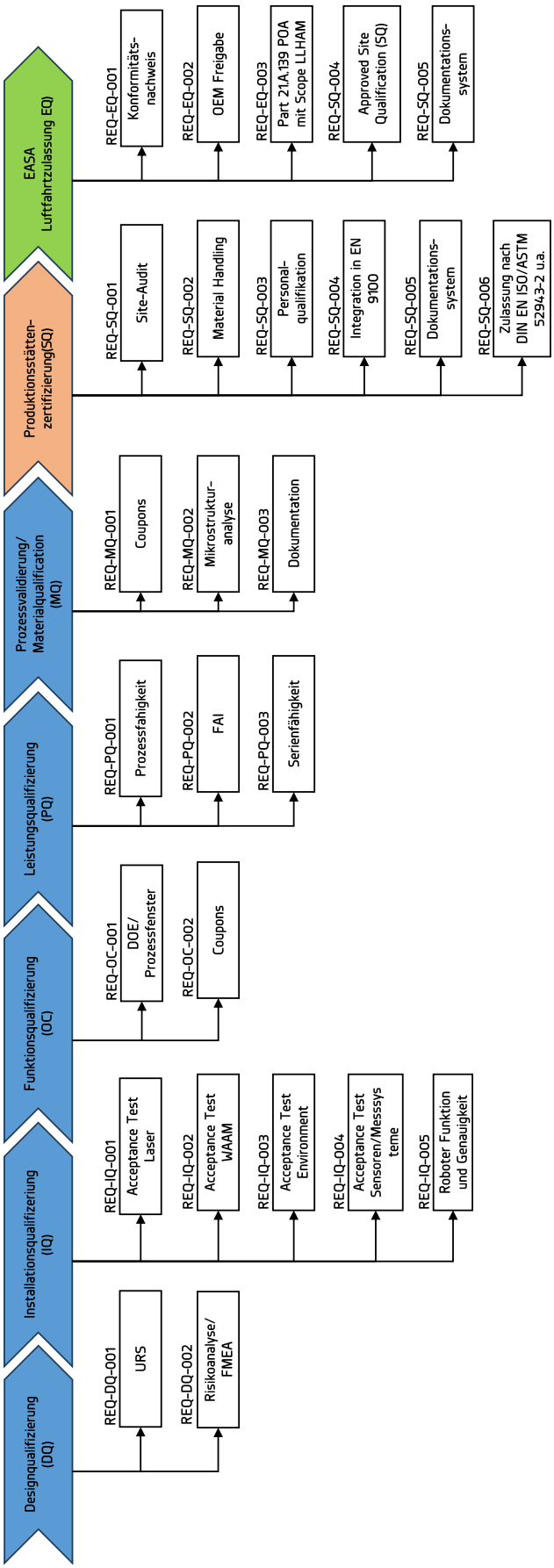
Im Wesentlichen wurde in diesem Zusammenhang das Qualitätskonzept für die Anforderungen REQ-OC-001 (Prozessfenster) und REQ-C-002 (Coupons) entwickelt. Zudem entstand eine Durchführungsmatrix für Siemens und das IAPT. Auf dieser Basis wurden Untersuchungen zur Festigkeit, Härte, Oberflächenrauheit, Mikro- und Makrostruktur, zum Einbrandverhalten sowie zu Nahtabmessungen mit und ohne Laserunterstützung durchgeführt. Dabei wurden sowohl kontinuierliche als auch gepulste Laserbetriebsarten berücksichtigt.

Als Ergebnis dieses Arbeitspakets wurden Prüfkriterien definiert; der Fokus lag jedoch häufig auf dem Vergleich der Verfahren WAAM und LLHAM, insbesondere im Hinblick auf Parameter wie Lamellenbreite, Korngröße, Festigkeit und Härte.

In Anknüpfung an AP 5.1 wurde der Weg zur Unternehmenszertifizierung und zur EASA-Zulassung aufgezeigt. Es ist jedoch anzumerken, dass dieser auf der nächsten Seite dargestellte Prozess lediglich der Veranschaulichung dient und sich aus den einschlägigen Normen ableitet; eine formale Abstimmung oder Vereinbarung hierzu erfolgte nicht.

Somit konnte HEGGEMANN als luftfahrtzertifiziertes Unternehmen und erfahrener luftfahrtzugelassener Herstellbetrieb dem Projektkonsortium in diesem Arbeitspaket der Weg zur Qualifizierung eines neuen Fertigungsprozesses aufzeigen.

Innerhalb des Gesamtprojektes haben die Partner IAPT, IPMT und HEGGEMANN die anderen Verbundpartner mit entsprechenden Inputs entlang der Qualifizierungskette unterstützt, so dass die Demonstrationszelle am IAPT nach Luftfahrtstandards erfolgreich realisiert werden konnte.


Designqualifizierung (DQ)
Installationsqualifizierung (IQ)
Funktionsqualifizierung (OC)
Leistungsqualifizierung (PQ)
Prozessvalidierung/ Materialqualification (MQ)
Produktionsstätten-zertifizierung(SQ)
EASA Luftfahrtzulassung EQ)
REQ-DQ-001
URS
REQ-DQ-002
Risikoanalyse/ FMEA
REQ-IQ-001
Acceptance Test Laser
REQ-IQ-002
Acceptance Test WAAM
REQ-IQ-003
Acceptance Test Environment
REQ-IQ-004
Acceptance Test Sensoren/Messsys teme
REQ-IQ-005
Roboter Funktion und Genauigkeit
REQ-OC-001
DOE/ Prozessfenster
REQ-OC-002
Coupons
REQ-PQ-001
Prozessfähigkeit
REQ-PQ-002
FAI
REQ-PQ-003
Serienfähigkeit
REQ-MQ-001
Coupons
REQ-MQ-002
Mikrostruktur-analyse
REQ-MQ-003
Dokumentation
REQ-SQ-001
Site-Audit
REQ-SQ-002
Material Handling
REQ-SQ-003
Personal-qualifikation
REQ-SQ-004
Integration in EN 9100
REQ-SQ-005
Dokumentations-system
REQ-SQ-006
Zulassung nach DIN EN ISO/ASTM 52943-2 u.a.
REQ-EQ-001
Konformitäts-nachweis
REQ-EQ-002
OEM Freigabe
REQ-EQ-003
Part 21A.139 POA mit Scope LLHAM
REQ-SQ-004
Approved Site Qualification (SQ)
REQ-SQ-005
Dokumentations-system

AP 5.3 - Prüfkonzept für die Systemversuche und die Bauteilfunktionsmuster

Im Rahmen des Prüfkonzepts wurden für die Systemversuche spezifische Geometrien von Begleitproben in diesem Arbeitspaket definiert, die der Validierung des Demonstrators dienten und im Vorfeld gezielt auf potenzielle technische Herausforderungen ausgelegt waren. Siemens hatte diese Anforderungen bereits in seine Softwarestrategien integriert und Testreihen entwickelt, bei denen reale Versuchskörper mit der Bahnplanung kombiniert wurden. Von diesen Ergebnissen profitierte auch das IAPT bei der Entwicklung des skalierten Demonstrators, da Versuchspläne zur Überhangprüfung sowie zur Bestimmung geometrischer Kenngrößen effizient umgesetzt werden konnten.

Aus prozesstechnischen Entwicklungsgründen lag ein Schwerpunkt der Prüfungen am IAPT auf der Etablierung und Optimierung des LLHAM-Prozesses. Hierbei standen insbesondere Untersuchungen zur Prozessstabilität im Vordergrund. Es konnte gezeigt werden, dass die Integration des Lasers in das Schmelzbad eine ausgeprägte Selbstregulierung der Stromquelle bewirkte und somit zur Stabilisierung des Prozesses beitrug.

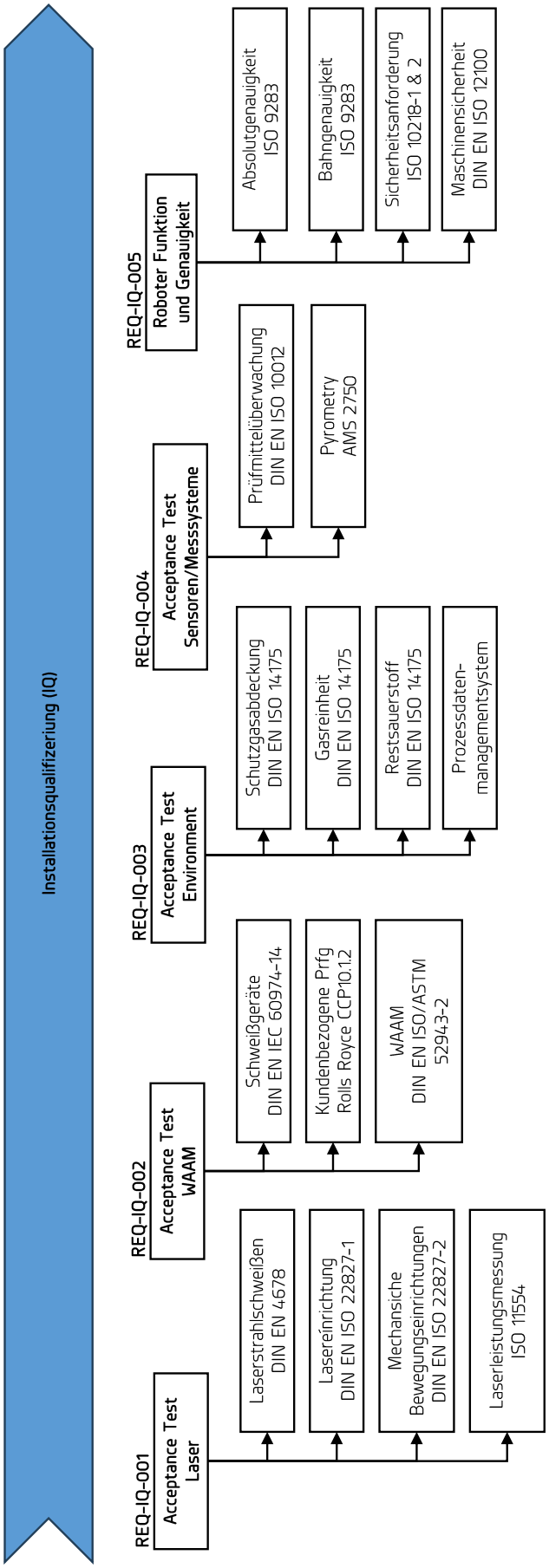
Nach der Definition eines stabilen Prozessfensters (vgl. Funktionsqualifizierung – OQ) wurden weiterführende Funktionstests durchgeführt, unter anderem zur Bestimmung der Wandrauhigkeit und zur Ableitung einer neuen BTF-Ratio. Unterstützend kam eine thermo-mechanische Simulation zum Einsatz, die eine optimale Positionierung der Spannelemente für Substratplatten in Test- und Bauteilversuchen ermöglichte. Diese Vorgehensweise trug ebenfalls zur Verbesserung der BTF-Ratio bei, da insbesondere bei größeren Bauteilen auftretende Verzüge ein erhöhtes Wandaufmaß erforderlich machen, was sich unmittelbar auf Zerspanungszeit, Energieverbrauch und ökologische Effizienz auswirkt.

Da die Arbeitspakete AP 5.1 bis AP 5.3 in enger Abstimmung entwickelt wurden, sind grundlegende konzeptionelle Überlegungen bereits in den Arbeitspaketen 5.1 und 5.2 dokumentiert. Die angewandten Prüfmethoden orientierten sich durchgängig an den Richtlinien des *Metallic Materials Properties Development and Standardization* (MMPDS) für Materialuntersuchungen.

Die Installationsprüfungen erfolgten weitgehend in Übereinstimmung mit nationalen und internationalen rechtlichen Vorgaben. Besonders berücksichtigt wurden dabei die Anforderungen an die Installationsqualifizierung, wie sie auch von anderen Konsortialpartnern – insbesondere Fooke und Racontec – gemäß der auf der folgenden Seite dargestellten Systematik angewendet wurden.

Die Prozessvorgaben zur Serienfähigkeit basieren auf dem Cmk-Wert, der jedoch eine Stichprobe von etwa 50 bis 100 Bauteilen erfordert. Da dies einem höheren *Technology Readiness Level* (TRL) entspricht, war die Serienfähigkeit nicht Teil des Forschungsvorhabens.

Für die statistische Auswertung wurden Verfahren nach MMPDS sowie Empfehlungen aus VDA Band 5, insbesondere die Varianzanalyse (ANOVA), herangezogen. In AP 1.4 kamen zudem der *Moving Average* mit Schwellenwert, das ARIMA-Modell und Dekompositionsmethoden zur Trennung von Trend- und Saisoneffekten zum Einsatz. Dadurch konnten zufällige und zyklische Einflüsse separiert und Unsicherheiten mittels *Maximum-Likelihood-* und Kleinste-Quadrate-Schätzung bestimmt werden.


Installationsqualifizierung (IQ)
REQ-IQ-001
Acceptance Test Laser
Laserstrahlschweißen DIN EN 4678
Lasereinrichtung DIN EN ISO 22827-1
Mechansiche Bewegungseinrichtungen DIN EN ISO 22827-2
Laserleistungsmessung ISO 11554
REQ-IQ-002
Acceptance Test WAAM
Schweißgeräte DIN EN IEC 60974-14
Kundenbezogene Prfg Rolls Royce CCP101.2
WAAM DIN EN ISO/ASTM 52943-2
REQ-IQ-003
Acceptance Test Environment
Schutzgasabdeckung DIN EN ISO 14175
Gasreinheit DIN EN ISO 14175
Restsauerstoff DIN EN ISO 14175
Prozessdaten-managementsystem
REQ-IQ-004
Acceptance Test Sensoren/Messsysteme
Prüfmittelüberwachung DIN EN ISO 10012
Pyrometry AMS 2750
REQ-IQ-005
Roboter Funktion und Genauigkeit
Absolutgenauigkeit ISO 9283
Bahngenauigkeit ISO 9283
Sicherheitsanforderung ISO 10218-1 & 2
Maschinensicherheit DIN EN ISO 12100

5.4 – Zusammenfassung und Bewertung des Gesamtergebnisses

Im Arbeitspaket (AP) 4.3 wurden wirtschaftliche und ökologische Bewertungen durchgeführt sowie der Technologiereifegrad (TRL) der Partner ermittelt: Siemens erreicht in der Projektlaufzeit für Aluminium TRL 6, während das IAPT mit dem Prozess für Titan aktuell bei TRL 5 steht.

HEGGEMANN spielte eine zentrale Rolle bei der Etablierung des LLHAM-Prozesses und trug maßgeblich zum Projekterfolg bei. Das Unternehmen implementierte umfassende Qualitätsansätze und regulatorische Methoden, die als solides Fundament für Planung, Beschaffung, Systemarchitektur, Absicherung und Qualifizierung dienten. Insbesondere das Requirements-Engineering von HEGGEMANN stellte sicher, dass Lasten- und Pflichtenhefte alle technischen Aspekte zeit- und inhaltsgerecht abbildeten und koordinierte die Schnittstellen zwischen den Partnern. Dank dieser strukturierten Vorgehensweise konnten Verschiebungen bei Lieferzeiten und Kosten ausgeglichen und Arbeitsanteile flexibel zwischen den Konsortialpartnern verschoben werden, um den Projekterfolg sicherzustellen.

Der von allen Partnern gemeinsam weiterentwickelte Hybridprozess demonstrierte das Potenzial der Kombination von WAAM-Verfahren und Zusatzlaser. Für Ti-6Al-4V wurde bei mittleren Prozessparametern ein Basketwave-Gefüge ohne α-Lamellenkolonien bei 1,2 mm Drahtdurchmesser erzeugt. Ohne weitere Optimierung konnte bereits eine Festigkeitssteigerung von 6–10 % bei gleichbleibender Dehnung erreicht werden. Die mikrostrukturelle Analyse der α-Lamellenbreite diente als Bewertungskriterium, da die Korngrößenbestimmung nur begrenzt auflösbar war. Es wurde ein innovativer Hybridschweißkopf entwickelt, der in mehreren Iterationen optimiert wurde, um Drahtförderung und Aufschmelzverhalten zu verbessern. KI-gestützte Versuchsreihen ermöglichten die gezielte Anpassung der Prozessparameter an Zielgrößen wie Nahtgeometrie und Mikrostruktur. Durch die methodische Einbindung in die Systemarchitektur und Kommunikationsschnittstellen wurden neue Parametereinflüsse frühzeitig berücksichtigt.

In AP 4.3 führte HEGGEMANN auch die wirtschaftliche und ökologische Bewertung in Kooperation mit den Verbundpartnern durch. Die Ergebnisse zeigten ein erhebliches Weiterentwicklungspotenzial und positive Verwertungsperspektiven. Trotz der hohen Anforderungen an die Integration der Einzelsysteme kann bei Einhaltung entsprechender Randbedingungen eine Produktivitätssteigerung gegenüber dem konventionellen WAAM-Verfahren in Aussicht gestellt werden. Die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens hängt stark vom Prototypen- oder Seriengeschäft ab. HEGGEMANN hat daher im eigenen WAAM-Prozess eine offene Roboterplattform mit Dreh-Kipp-Manipulator und Zusatzachse eingesetzt, die auch Lohnschweißungen ermöglicht und den Maschinenstundensatz durch hohe Auslastung reduziert.

Aus Nachhaltigkeitsgründen setzte HEGGEMANN auf adaptierbare Plug-and-Play-Lösungen mit standardisierten Hard- und Software-Schnittstellen. Die im Projektrahmen realisierte Anlage am IAPT spiegelt diesen Ansatz wider und erlaubt eine flexible Nutzung für weitere Prozessvarianten.

7. Zusammenfassung der Projektergebnisse

Im abgeschlossenen Innovationsvorhaben „AMAvia“ – Digitalisierte Prozesskette für die innovative Kombination von Laser-Lichtbogen-Hybrid-Additive-Manufacturing (LLHAM) und intelligenten Fräsprozessen zur Produktivitäts- und Qualitätssteigerung bei der Herstellung metallischer Großstrukturen in der Aviation-Industrie wurde im Projektverbund ein Verfahren zur additiven Fertigung von Titan- und Aluminiumbauteilen unter Berücksichtigung luftfahrttechnischer Qualitätsanforderungen erfolgreich entwickelt und erprobt. Dank der gewährten Fördermittel konnte die Forschung in diesem ambitionierten Vorhaben auf hohem Niveau durchgeführt werden, wodurch neben dem LLHAM-Prozess auch innovative Zerspanungsmethoden erforscht und im Labormaßstab unter realitätsnahen Einsatzbedingungen im Hinblick auf eine spätere industrielle Verwertung erprobt werden konnten.

HEGGEMANN übernahm im Verbund die Verantwortung für die luftfahrttechnische Qualitätsabsicherung sowie den Aufbau und die Erprobung des WAAM-Vergleichsprozesses im industrienahen Umfeld. Darüber hinaus unterstützte das Unternehmen die Kalkulation und Simulation der Prozessparameter. Durch die enge Zusammenarbeit der Partner und die hohe fachliche Expertise konnte das Projekt trotz der durch die Coronapandemie bedingten Einschränkungen bei Anlagen- und Personalkapazitäten nach einer kostenneutralen Laufzeitverlängerung erfolgreich abgeschlossen werden.

Die mittels LLHAM-Verfahren additiv hergestellten Probenkörper zeigten bezogen auf Vergleichsproben aus Standardwalzhalbzeugen im Verlauf des Projekts eine gesteigerte Festigkeit bei gleichbleibender Mikrostruktur. Es entstand für den Werkstoff Ti-6Al-4V (Grade 5 Titan) ein Basketwave-Gefüge, vergleichbar einem Korbgeflecht aus lamellaren α- und β-Phasen, wobei unerwünschte α-Kollonien nicht auftraten. Obwohl aufgrund der begrenzten Projektlaufzeit weitergehende Optimierungen zur Maximierung der Festigkeit bei minimaler Lamellenbreite nicht mehr durchgeführt werden konnten, wurden die definierten Projektziele erreicht.

Die erzielten Ergebnisse zeigen Vorteile des LLHAM-Verfahrens gegenüber konventionellem WAAM, insbesondere im Hinblick auf energetische Effizienz, Festigkeit und Prozessstabilität. Weitere Forschung ist lohnenswert, da eine Reduzierung der Lamellenbreite und eine gezielte Beeinflussung des primär-β-Korns voraussichtlich zu einer weiteren Verbesserung der Festigkeit und einer geringeren Rissausbreitungsneigung führen würde. Besonders bei Ti-6Al-4V könnten so metallurgische Effekte genutzt werden, die mit herkömmlichen WAAM-Prozessen nur eingeschränkt erreichbar sind, wenngleich dies einen höheren Entwicklungsaufwand erfordert.

Nach dem Projektende zum 30.04.2025 werden Demonstratoren und begleitende Öffentlichkeitsarbeit, unter anderem für die ILA 2026, auf freiwilliger Basis fortgeführt. Insgesamt zeigt das Projekt, wie gezielte Fördermittel und die hervorragende Zusammenarbeit im Verbund die Entwicklung innovativer Fertigungstechnologien entscheidend beschleunigen und zu hochwertigen, industrienahen Ergebnissen führen können.

8. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Für die Erreichung der ambitionierten Projektziele waren über die Projektlaufzeit von 54 Monaten im Wesentlichen umfangreiche Personalaufwände erforderlich. Im Zuge der kostenneutralen Laufzeitverlängerung wurde daher auch eine Umwidmung von Mitteln beantragt und bewilligt. Somit stellen die Personalkosten mit 77,8 % der Gesamtaufwände die mit Abstand größte Position des zahlenmäßigen Nachweises dar.

3,5 % der Gesamtaufwände entfallen auf die Materialkosten für die Durchführung der eigenen Versuchsreihen. In vergleichbarer Größenordnung lagen 3,4 % der zuwendungsfähigen Kosten die Aufwände für externe F&E-Fremdleistungen. Diese entstanden bei zwei Hochschulen für spezielle Thermografie- und optische 3D-Messungen der additiv erzeugten Strukturen zur Entwicklung von Qualitätssicherungsstrategien nach luftfahrttypischen Anforderungen.

Für vergleichende Untersuchungen wurden zudem weitere interne Ressourcen benötigt, allerdings in deutlich geringerem Umfang als ursprünglich geplant. Die Kosten für diese innerbetriebliche Leistungen lagen daher mit 0,4 % der Gesamtaufwände deutlich unter den hierfür veranschlagten 1,1 %.

Für Aufwände für die Projektadministration und Projektsteuerung inkl. allgemeiner Verwaltungskosten, Reisekosten und sonstiger unmittelbaren Vorhabenkosten summieren sich zum Ablauf der Projektlaufzeit auf 14,9 % der zuwendungsfähigen Kosten.

Im Teilprojekt von HEGGEMANN wurden die Gesamtkosten um lediglich 0,6 % im Vergleich zu den im November 2020 bewilligten Aufwänden überschritten. Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass HEGGEMANN alle Aufwände in der 54-monatigen Projektlaufzeit im Sinne des AMAvia-Projekts und des Luftfahrtforschungsprogramms eingesetzt hat.

9. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Durch die im Projekt durchgeführten Arbeiten konnte ein erhebliches Potenzial zur Weiterentwicklung additiver Fertigungsverfahren erschlossen werden. Insbesondere wurden Ansätze identifiziert, um kostenintensive Vor-, Zwischen- und Nachbearbeitungsschritte zu reduzieren und dadurch wirtschaftlichere sowie nachhaltigere Konstruktions- und Fertigungsprozesse zu ermöglichen. HEGGEMANN leistete einen zentralen Beitrag, indem Qualifizierungsaspekte aus der Luft- und Raumfahrt erfolgreich auf die Projektpartner übertragen wurden. Durch die umfassende Auseinandersetzung mit dem neuen LLHAM-Prozess – einschließlich der technischen, wirtschaftlichen, ökologischen und simulativen Dimension – wird HEGGEMANN in die Lage versetzt, die gewonnenen Erkenntnisse direkt in das eigene Technologieportfolio zu integrieren und für zukünftige Kundenprojekte nutzbar machen.

Die Realisierung dieser anspruchsvollen und insbesondere personalintensiven Forschungsarbeiten wäre ohne die Bereitstellung öffentlicher Fördermittel in der gegebenen Tiefe und Qualität nicht möglich gewesen. Die Förderung ermöglichte die Bearbeitung komplexer wissenschaftlich-technischer Fragestellungen, deren Umfang und interdisziplinärer Charakter weit über die Möglichkeiten einer eigenfinanzierten industriellen Entwicklung in einem mittelständischen Unternehmen wie HEGGEMANN hinausgehen.

Die erzielten Ergebnisse belegen die hohe Effizienz der eingesetzten Fördermittel: Sie führten zu innovativen technologischen Lösungen, einem tiefen Prozessverständnis und einer erfolgreichen Wissensübertragung zwischen industriellen, institutionellen und akademischen Partnern. Damit wurde eine exzellente Grundlage für die industrielle Verwertung geschaffen, die den Transfer in die Praxis nachhaltig unterstützt und den Standort Deutschland im Bereich der additiven Fertigungstechnologien stärkt.

10. Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere bzgl. Verwertbarkeit der Ergebnisse

Obwohl additive Fertigungsverfahren für Titanstrukturen zunehmend als etabliert wahrgenommen werden, bestehen nach wie vor erhebliche Herausforderungen entlang der gesamten Prozesskette, insbesondere bei der langzeitstabilen Prozessführung über mehrere Stunden abhängig von Bauteilgröße und -geometrie. Diese Herausforderungen erfordern weiterhin gezielte Forschungs- und Entwicklungsarbeiten.

Das LLHAM-Verfahren eröffnet hier neue Potenziale durch die zusätzliche Laseranregung, die eine gezielte Beeinflussung der Marangoni-Strömung im Schmelzbad ermöglicht. Dies wirkt sich positiv auf Oberflächenspannung und Erstarrungskinematik aus. Auch Laser-Vor- und Nachbehandlungen zeigen Vorteile in Bezug auf Bauteilqualität. Aufgrund seines drahtbasierten Ansatzes erlaubt das Verfahren eine höhere Packungsdichte und Auftragsrate als bei pulverbettbasierten additiven Verfahren, wodurch die Fertigung größerer und funktional komplexerer Bauteile effizienter wird.

Die Projektergebnisse sind unmittelbar für die industrielle Anwendung nutzbar: Das Verfahren kann in das Technologieportfolio von HEGGEMANN integriert werden und erweitert damit die Möglichkeiten zur Anwendung energie- und materialeffizienter Herstellprozesse bei der Entwicklung und Fertigung komplexer metallischer Strukturbauteile u.a. für Luftfahrtanwendungen. Die durch das Projekt erweiterten Simulationsmöglichkeiten erlauben eine präzisere thermische Vorhersagbarkeit, die das Zusammenspiel von Metall, Schutzgas, Schweißprozess und Laser abbildet und somit die Energieeinbringung gezielt optimiert.

Durch die additive Herstellung endkonturnaher Bauteile lassen sich funktionalere Komponenten realisieren. Besonders die Beibehaltung der Außengeometrie bei nur teilweiser Endbearbeitung funktionaler Flächen verbessert die Akzeptanz bei hochpräzisen Oberflächen und unterstützt die industrielle Verwertbarkeit. Die Kombination von WAAM und Laser eröffnet zudem höhere Aufheiz- und Abkühlgradienten, wodurch die Verarbeitung neuer Materialien und Materialkombinationen sowie die Fertigung filigraner, energieeffizienter Schweißnähte möglich wird. Dies erweitert das potenzielle Kunden- und Werkstoffportfolio erheblich.

Die im Projekt erarbeitete Expertise in Simulation und Qualifizierung stärkt die Marktposition der HEGGEMANN AG im Hochtechnologiemarkt der Luft- und Raumfahrt nachhaltig. Es eröffnen sich zudem neue innovative und digitalbasierte Geschäftsfelder, wie beispielsweise X-in-the-Loop-Konzepte (Simulation-in-the-Loop, Model-in-the-Loop, Software-in-the-Loop) für predictive Maintenance, Verschleißüberwachung oder Bahnplanung als Online-Dienstleistung.

Die laufende Zusammenarbeit mit OEMs wie Boeing fokussiert auf die Werkstoffentwicklung von Ti-6Al-4V und die Optimierung der Mikrostruktur in der drahtbasierten additiven Fertigung. Das Verfahren und die gewonnenen Erkenntnisse fließen direkt in technische Diskussionen ein und erhöhen mittel- und langfristig das industrielle Potenzial für die Luftfahrtzulieferindustrie in Deutschland.

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

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

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

Die Veröffentlichung aller wesentlichen AMAvia-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 der Projektpartner TUHH, IAPT und Siemens veröffentlicht:

HEGGEMANN selbst hat mehrere Vorträge gehalten, bei denen das Verfahren und das Projektkonsortium beschrieben und/oder genannt wurde:

- Vortrag bei effiPrint Netzwerk Uni Chemnitz am 14.03.2024
- Vortrag bei der RapidTech 14.05.2024
- Vortrag beim DMRC (Direct Manufacturing Research Center) am 24.09.2024
- Vortrag bei der Schweißfachtagung Emmetten (Schweiz) voestAlpine am 07.11.2024
- Vortrag beim Fügetechnischen Kolloquium Paderborn am 27.11.2024