

ABSCHLUSSBERICHT
AMAvia

Zuwendungsempfänger:

SIEMENS AG
Otto-Hahn-Ring 6
81739 München

Förderkennzeichen:

20W1902D

Vorhabenbezeichnung:

AMAvia:

Digitalisierte Prozesskette für die innovative Kombination von Laser-Lichtbogen-Hybrid-Additive-Manufacturing (LLHAM) und intelligenten Fräsprozessen

Verbundpartner:

Heggemann AG, Fraunhofer IAPT, Fooke GmbH, racontec GmbH, TU Hamburg

Laufzeit des Vorhabens und Berichtszeitraum:

01.11.2020 – 30.04.2025

Ansprechpartner:

Dr. Tobias Kamps

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis2

1 Kurzfassung3

 1.1 Aufgabenstellung.....3

 1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde3

 1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens.....3

 1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde4

 1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen.4

2 Ausführlicher Sachbericht6

 2.1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele6

 2.1.1 Arbeitspaket 17

 2.1.2 Arbeitspaket 29

 2.1.3 Arbeitspaket 3 11

 2.1.4 Arbeitspaket 4 19

 2.1.5 Arbeitspaket 5 21

 2.2 wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises..... 23

 2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit..... 23

 2.4 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses 23

 2.5 Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts bei anderen Stellen..... 24

 2.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses 24

3 Anhang 24

 3.1 Hinweise zu Patenten, Schutzrechten etc..... 24

1 Kurzfassung

1.1 Aufgabenstellung

Ziel des Einzelvorhabens Digi-LLHAM (Laser-Lichtbogen-Hybrid-AM) war neben der Entwicklung der geeigneten Hardware insbesondere die flankierende Entwicklung der digitalen Wertschöpfungskette. Kernstück der digitalen Wertschöpfungskette ist eine intelligente Steuerung, die im Projekt auf der Siemens-Produktlinie SINUMERIK basieren soll. Sinumerik RunMyRobot wurde gezielt für die Verbesserung der Genauigkeit von Robotern in der Hybriden Fertigung (Laser-Lichtbogen-Hybrid sowie Zerspanungsoperationen) eingesetzt. Die SINUMERIK wurde dabei ebenfalls für die Realisierung von intelligenter Messtechnik für den LLHAM-Prozess, die Erstellung eines digitalen Zwillings und schließlich der Umsetzung von Closed-loop-Ansätzen genutzt.

Daneben wurden auf Basis der Siemens CAD/CAM-Lösung NX die digitale Wertschöpfungskette auch in der Prozessvorbereitung wie auch in der Visualisierung des digitalen Zwillings entwickelt.

Die Siemens PL Software NX bietet alle notwendigen Funktionen in einem einzigen integrierten System – von der Konstruktion über das Auftragschweißen bis zur Validierung nach der additiven Fertigung bzw. nach dem Zerspanen.

Somit ist das Ziel des Einzelvorhabens die Ergänzung der Hardwareentwicklungen mit geeigneten Software-Lösungen (z. B. zur CAM-Planung) für die Erzielung der Aufbauratensteigerung um min. 50 % gegenüber der Fertigung ohne Laser, der Reduktion der resultierenden Rauheit um 20 % und der Produktivitätssteigerung der Zerspanungsprozesse um ca. 35 %. Dazu wurden die Grundlagenuntersuchungen und Hardware-Entwicklungen (z. B. Prozesstechnik, Sensorik, Steuerung) durchgeführt, während parallel die Entwicklung einer digitalen Prozesskette zur Prozessvorbereitung (z. B. CAM-Planung, Parameteroptimierung durch ML-Ansätze), Überwachung (z. B. Sensortechnik zur Qualitätserfassung) und Auswertung (z. B. Darstellung der Sensor- und Steuerungswerte als Digital Twin) fokussiert.

1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Die Siemens AG nahm am Projekt mit der Unternehmenseinheit der zentralen Konzernforschung teil. Für eine zentral gesteuerte effiziente Entwicklung stellte Siemens dazu eine Forschergruppe wie auch Laboranlagentechnik und Werkzeuge (DED-Verfahrenstechnik des Wire-Arc-AM, Sinumerik-Steuerungstechnik, Siemens NX als Werkzeug für eine digitale Prozesskette) bereit. Zusätzlich wurden intern gezielt Business Units wie z. B. die Digital Industry – Motion Control (DI MC) eingebunden. Somit fungierte Siemens nicht nur als Entwickler in der Prozesstechnik, sondern auch als Anwender in einer späteren Verwendung in der PLM-Software und in der Steuerungstechnik.

Im Projekt wurden Fragestellungen zur AM-Prozesstechnik, Werkstofftechnik, Zerspanungsprozess, digitalen Prozesskette und Anwendungsentwicklung parallel vorangetrieben, die von zahlreichen technischen und wissenschaftlichen Risiken gekennzeichnet waren. Durch einen engen Austausch und ein komplementäres Konsortium konnte die Projektarbeit effizient durchgeführt werden. Ohne eine Förderung wären die Themen nicht in der notwendigen Tiefe abgebildet worden und wären aufgrund der zahlreichen Risiken teilweise sequenziell erforscht und entwickelt worden, sodass somit auch eine wesentlich längere Projektlaufzeit entsteht.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Im Projekt erarbeitete SAG gemeinsam mit dem IAPT und der Fa. HEGGEMANN ein umfangreiches AM-Prozesswissen und ergänzt den Stand der Technik u. a. durch die intensive Betrachtung des Lasereinflusses (z. B. Intensitätsverteilung, Fokusvariation) im unteren Leistungsbereich. Der Fokus lag auf den Werkstoffen Aluminium und Titan. Die SAG trug zum Verständnis von Fehlstelleneinflüssen bei, indem bewusst Unregelmäßigkeiten erzeugt und anschließend Lösungsstrategien erarbeitet werden (Effects of Defects). Dabei wurden unter Verwendung der SINUMERIK-Steuerung Konzepte für die qualitative und quantitative Validierung der Prozessqualität, für die Erstellung eines digitalen Zwillings und auch für die Closed-loop-Regelung des LLHAM-Prozesses entwickelt werden.

Zudem beschäftigt sich die SAG mit einer integrierten Roboterzerspanung von Aluminium in 5 Achsen mit der Entwicklung und Implementierung von digitalen Ansätzen zur Zerspanungskräftekompensation. Durch die Zielstellung einer reduzierten Formabweichung von AM-Strukturen und damit reduzierten Zerspanvolumen wurde die Effizienz der Zerspanung erhöht. Für eine wissenschaftliche Betrachtung der Ergebnisse wurde dabei eng mit dem IPMT und der Fa. FOOKE kooperiert.

Durch Entwicklung und Bereitstellung der digitalen Prozesskette basierend auf Siemens NX und der Siemens-Steuerung wurde eine integrierte Toolchain zwischen den Einzelprozessen realisiert. Größter Meilenstein lag hierbei in der Erstellung des digitalen Zwillings, der durch eine den LLHAM-Prozess

begleitende Sensorik aufgezeichnet wird. Basierend auf dem digitalen Zwilling erfolgte eine Überführung der Real-Geometrie an die CAM-Planung der Roboterzerspanung.

Der Stand der Technik wurde in diesem Projekt um eine durchgängige digitale Kette vom CAD über CAM über die SINUMERIK-Steuerung des Roboters bis hin zum hybriden Fertigungsprozess erarbeitet. Besonderer Fokus lag dabei auf die Wechselwirkung zwischen der Unsicherheit im additiven Prozess (z. B. Form- und Lagetoleranzen) und der Einplanung der kompensierenden Zerspanungsoperationen gelegt.

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Die konventionelle Fertigung von Luftfahrtbauteilen basierte zu dieser Zeit größtenteils auf der Zerspanung aus Vollmaterial, was oft einen erheblichen Materialabtrag erforderte. Demgegenüber bot der additive Herstellungsprozess (AM) von Halbzeugen, insbesondere durch die endkonturnahe Fertigung, erhebliche Einsparpotenziale. Folglich erfuhr die additive Fertigung von Bauteilen für die Luftfahrt in den vorherigen Jahren ein signifikantes Wachstum, wobei laser- und pulverbett-basierte Verfahren (LB-PBF) zu dieser Zeit das dominierende Verfahren darstellte. Parallel dazu gewannen neuartige und potenziell produktivere additive Fertigungstechnologien, wie beispielsweise das Draht-Auftragschweißen (WAAM / DED-Arc), zunehmend an Bedeutung. Dies galt besonders im Bereich Titan, da dieser Werkstoff aufgrund seiner Kompatibilität mit kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen und seinen vorteilhaften mechanischen Eigenschaften für zukünftige Flugzeuggenerationen besonders attraktiv war. Die in diesem Bereich häufig genutzte Legierung TiAl6V4 stellte jedoch aufgrund ihrer Materialeigenschaften eine Herausforderung in der spanenden Bearbeitung dar.

Studien zur Zerspanung von mittels LB-PBF gefertigten Halbzeugen hatten gezeigt, dass deren Werkstoffeigenschaften denen konventionell hergestellter Titanwerkstoffe ähnelten. Die Übertragbarkeit dieser Erkenntnisse auf drahtbasierte AM-Verfahren war zum Zeitpunkt der Projektplanung jedoch noch unzureichend erforscht. Industriell wurde das Draht-Auftragschweißen (WAAM) aufgrund seines wirtschaftlichen Potenzials bereits erprobt. Beide genannten AM-Verfahren erforderten eine nachfolgende spanende Bearbeitung und brachten neue Herausforderungen für die spanende Fertigbearbeitung mit sich.

Die Zerspanung endkonturnaher, dünnwandiger Halbzeuge war problematisch, da prozessbedingte Aufmaßschwankungen und Eigenspannungen die nachfolgende Fräsbearbeitung erschweren konnte. Eigenspannungen, die sowohl im AM-Prozess als auch in der Zerspanung entstanden, konnten zu Bauteilverzug führen, was in bleibenden Lagefehlern am Bauteil resultierte. Die Quantifizierung und Ableitung geeigneter Bearbeitungsstrategien erfolgten bisher primär für während der Bearbeitung eingespannte Halbzeuge. Die dünnwandigen AM-Stege von Strukturbauteilen sind während der Bearbeitung jedoch nicht eingespannt und Verformen sich daher bereits während der Bearbeitung. So entstehen neben Lagefehlern auch Maßfehler der Stegdicke, die in dieser Form noch nicht untersucht wurden.

Im Bestreben nach kostengünstigeren Bearbeitungslösungen etablierte sich der Industrieroboter (IR) als Alternative zu Werkzeugmaschinen, erreichte aber deren Genauigkeit und Produktivität noch nicht. Seine geringe Steifigkeit führte bei hochfesten Legierungen zu Maßabweichungen, und die dynamische Steifigkeit limitierte die robotergeführte Zerspanung, besonders bei Titan mit niedrigen Drehzahlen und höheren Schnittkräften. Der Einsatz wurde daher vor allem für Aluminium angestrebt. Auch hier galt es jedoch, die Prozessstabilität zu beherrschen. Der in der Industrie etablierte Ansatz bestand in der Reduzierung der axialen und radialen Schnitttiefe, was stets mit einem Produktivitätsverlust verbunden war. Ziel des Projekts war daher die Entwicklung alternativer Strategien für einen stabilen Zerspanprozess ohne Produktivitätseinbußen.

Für eine effiziente hybride Bearbeitungskette fehlte zudem eine durchgängige digitale Prozesskette, die von der Konstruktion und Pfadplanung über die hybrid-additive und subtraktive Bearbeitung hin zur Qualitätssicherung reicht. Zudem fehlten Simulationswerkzeuge, die die oben beschriebenen Herausforderungen zur Fertigungsgenauigkeit im Laser-Lichtbogen-Hybridverfahren und im robotergestützten Zerspanprozess angingen, z. B. zur Verbesserung der Bahngenauigkeit in der Roboterzerspanung unter Berücksichtigung der Zerspankräfte oder der Fertigungsgüte bei der endkonturnahen Herstellung im additiven WAAM- bzw. LLHAM-Verfahren.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen.

Im Laufe des Projektes fand ein umfangreicher Austausch mit allen Projektpartnern statt. Die Anforderungen wurden mit Heggemann und IAPT erarbeitet. Der Aufbau der Pilotlinie wurde gemeinsam mit Racontec und dem IAPT sowie dem IPMT vorangetrieben. Optimierung zu den Zerspanungsprozessen wurden gemeinsam mit IPMT und Fooke erarbeitet.

Bei Siemens durchgeführte Fräsversuche in Aluminium wurden vom IPMT untersucht, um die Eignung des Roboters für die Fräsbearbeitung als auch Prozessstabilitäten zu ermitteln und ein tieferes Prozessverständnis zu erlangen.

Die Zerspanungssimulation wurde in die CAM-Planung integriert, dabei unterstützte das IPMT mit Fräsversuchen und Kraftmessungen. Die real erhobenen Daten sind notwendig, um die Rechengrößen der Simulation zu definieren. Das Fachwissen von Siemens zur Robotik und CAM-Planung wurde mit der Expertise des IPMT in der Zerspanung und Schnittkraftberechnung kombiniert, um den Versuchsumfang so zu definieren, dass eine Validierung der Simulationswerkzeuge an praxisnahen Anwendungsbeispielen ermöglicht wird. Hauptaugenmerk der Simulation ist das Umfangsfräsen/Besäumen mit VHM-Schafffräsern in Aluminium.

Gemäß der Arbeitspakete und –pläne in AMAvia fand ein intensiver Austausch zwischen der Siemens AG und dem Fraunhofer IAPT statt. Ein Großteil dieser Arbeit umfasst dabei das Erstellen eines Maschinenmodells für die neue Multi-Roboter-Anlage des IAPT. Das Maschinenmodell ermöglicht die CAM-Planung für additive, subtraktive und hybride Fertigung, es implementiert maschinen- und prozessspezifische Befehle und Optimierungen und erlaubt es dem Anwender den Prozess hinsichtlich Prozessstabilität, Kollisionen uvm. zu simulieren. In vielen Meetings zwischen dem IAPT und Siemens wurden die Ergebnisse des Maschinenmodells aus München auf die neue Anlage übertragen. Zusätzlich fand eine Unterweisung in die Prozesskette der CAM-Planung und das Vorführen von Beispielen statt.

Da für die Anlage des IAPT nicht nur die CAM-Planung mit Siemens NX, sondern auch die Maschinensteuerung mit einem Siemens-System (Sinumerik ONE mit Run MyRobot) umgesetzt wird, fanden auch dazu Projekttreffen vor Ort statt. Besonders hervorzuheben sind dabei der Austausch zur Integration der Schweißquelle, externer Sensoren und Aktoren (z.B. Bauteilkühlung) in Kooperation mit Racontec. Auch die Anlagenbedienung für komplexe Multi-Achs-Fertigung und die Fertigung in mehreren Aufspannungen waren Teil des Wissenstransfers von Siemens.

Zudem bestand ein regelmäßiger Austausch mit den Industriepartnern HEGGEMANN, Racontec und FOOKE zu Forschungstätigkeiten und Anforderungen aus Luftfahrt, Anlagenintegration und Anwendung der Prozesstechnik.

2 Ausführlicher Sachbericht

Zusammengefasst wurde im Projekt die Digitalisierte Prozesskette für die innovative Kombination von Laser-Lichtbogen-Hybrid-Additive-Manufacturing (LLHAM) und intelligenten Fräsprozessen erarbeitet. Ein Überblick zu den Innovationen, der erarbeiteten Prozesskette und der Simulationswerkzeuge bieten Abbildung 1 bis 2.

AMAvia: Digitalisierte Prozesskette für die innovative Kombination von Laser-Lichtbogen-Hybrid-Additive-Manufacturing (LLHAM) und intelligenten Fräsprozessen

Innovation:
Integriertes CAD/CAM-Tool für Hybridprozesse



Produktplattform:
Siemens NX

Innovation:
Integrierte Steuerungstechnik für den Multi-Roboter/Multi-Prozess-Ansatz



Produktplattform:
Siemens Sinumerik + Industrial Edge

Innovation:
Produktive Additive Fertigung und Nachbearbeitung von großvolumigen Aerospace-Strukturen

- **Aufbautatensteigerung von 25 %** durch Simulation und CAM-Tools
- **Simulationsbasierte Vorhersage der Post-AM-Geometrie** für effiziente Nachbearbeitung
- Verwendung von **High-Performance-Luftfahrt-Materialien:** 6000er und 2000er Aluminiumlegierung sowie Ti64
- **Laser-basierte Beeinflussung der Makrostruktur** bei Bauteilen zur Performancesteigerung aus der Fertigung

Abbildung 1: Erarbeitete Ergebnisse im Projekt AMAvia

AMAvia: Digitalisierte Prozesskette für die innovative Kombination von Laser-Lichtbogen-Hybrid-Additive-Manufacturing (LLHAM) und intelligenten Fräsprozessen



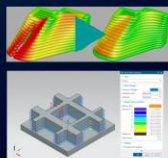


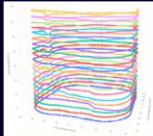
Siemens NX		Sinumerik- und Industrial Edge-basiert			
CAD	CAM	Simulation	Laser-based WAAM	Milling	Quality
<ul style="list-style-type: none"> • Fertigungsgerechtes Design • Segmentierung für Multi-Achs-DED • Maschinensetup 	<ul style="list-style-type: none"> • Generelle Pfadplanung • Multi-Achs / Multi-Prozess-Übersetzung in G-Code • Kollisionsvermeidung 	<ul style="list-style-type: none"> • Zerspankräfte • Resultierende Realgeometrie nach Multi-Achs-Prozess • Optimierung und Validierung der Pfade 	<ul style="list-style-type: none"> • Closed-loop Regelung der Prozessparameter und der Temperatur • Online Prozessüberwachung 	<ul style="list-style-type: none"> • Closed-loop Regelung der Prozessparameter • Online Prozessüberwachung • Simulierte Zerspankräfte zur Genauigkeitssteigerung 	<ul style="list-style-type: none"> • Prozessdaten und Multi-sensor-Datenfusion entlang des Pfades • Bauteil-Vermessung
					

Abbildung 2: Digitalisierte Prozesskette für die innovative Kombination von Laser-Lichtbogen-Hybrid-Additive-Manufacturing (LLHAM) und intelligenten Fräsprozessen

2.1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

2.1.1 Arbeitspaket 1

Ziel das AP 1 war die Entwicklung einer Additive Manufacturing Hybrid-Prozesstechnik.

2.1.1.1 Arbeitspaket 1.1

Die im Projekt in Betrieb genommene neue Schweißquelle hat zusammen mit angepassten CAM-Strategien und Prozessparametern den **Meilenstein M1** der Aufbauraten-Steigerung ermöglicht. Ziel des Meilenstein 1 ist die *Steigerung der Aufbauraten um 25%*. Durch Kombination verschiedener Schweißkennlinien konnte die Aufbauraten in Massivstrukturen signifikant gesteigert werden. Für Hohlstrukturen (einspurig) und die Außenkontur von Massivbauteilen wurde der in früheren Aufbauten verwendete CMT-Prozess verwendet. Im reinen Lichtbogenschweißen war das CMT-Schweißen von Aluminium bis 1.8 kg/h in großen Strukturen möglich. Kleine Segmente oder Strukturen, die die Prozesswärme nicht gut ableiten, konnten mit bis zu 1.3 kg/h aufgebaut werden. Indem Füllstrukturen mit dem PMC-Prozess geschweißt werden (Aufbauraten bis ca. 2.7 kg/h), konnte eine durchschnittliche Aufbauraten von 0.9 kg/h erreicht werden. Insgesamt konnte die Aufbauraten bei Massivstrukturen um 28% gegenüber dem reinen CMT-Prozess gesteigert werden.

Ergebnis in diesem AP ist zudem die Identifizierung der Anforderungen sowie Kriterien zur Bewertung der Prozessqualität und Ableitung eines Versuchsplans zur Bestimmung von Haupteinflussfaktoren und Bildung einer Datenbank. Dieser bot die Basis für die Grundlagenversuche in AP 1.1.4.

Das Arbeitspaket sah außerdem die Durchführung von Grundlagenversuchen zum Laser-Lichtbogen-Hybrid-Schweißen von Aluminium vor. In verschiedenen Versuchen wurden dünnwandige Wände mit der Breite einer einzelnen Schweißnaht, als auch Wände mit variabler Dicke durch das Mäandern des Werkzeuges aufgebaut. Mit diesen Versuchsergebnissen ließen sich die erreichbaren Auftragsraten feststellen und die dabei entstandenen typischen Nahtquerschnitte ermitteln.

Diese Vorversuche bildeten die Grundlage für die exemplarische Fertigung komplexerer Strukturen, welche die zuvor ermittelten Ergebnisse bestätigten. Die während dem Prozess wechselnden thermischen Eigenschaften des Bauteils, haben gezeigt, dass die in den Grundlagenversuchen ermittelten Parameter durch komplexere Simulationen und Versuche bauteilabhängig angepasst werden müssen. Für die Grundlagenversuche wurde die Aluminiumlegierung 6060 (AlMgSi0,5) verwendet.

Projektergebnis war ebenfalls die Prozessoptimierung und Ermittlung von Prozessgrenzen zur Erreichung minimale Oberflächenrauheiten bzw. maximaler Aufbauraten. Durch Kombination verschiedener Schweißprozesse für unterschiedliche Bauteilbereiche, sowie Werkzeugweg-Typen (Außenkontur, Füllkontur, Start-, Endpunkt) wurden Prozesslimits für das CMT- und das PMC-Schweißen gefunden. Im CMT-Prozess wurden bis zu 2.0 kg/h realisiert, da diese Werte dem Limit der TPSi 500 Schweißquelle entsprechen, wurden in den folgenden Versuchen geringfügig kleinere Auftragsraten eingestellt, um eine in-situ Prozessregelung zu ermöglichen. Der PMC-Prozess ermöglicht Auftragsraten von maximal 4.0 kg/h. Bei diesen Auftragsraten war der Prozess jedoch sehr instabil und für AM-Verfahren unbrauchbar. Für AM-Anwendungen, insbesondere Füllstrukturen lag das Prozesslimit bei Auftragsraten von 2.7 kg/h. Für die Ermittlung und Optimierung der Strukturrauheit wurde in Kombination mit 1.1.7 ein Simulationstool entwickelt.

Die in diesem Arbeitspaket vorgesehene Validierung der Prozessgrenzen konnte bei der Siemens AG nur für Aluminium durchgeführt werden. Es wurden Test-Geometrien entwickelt, an denen die gesteigerten Aufbauraten durch geeignete Bahnmuster umsetzbar waren. Ein Übertragen dieser Programme auf die Maschinen des IAPT wurde nicht durchgeführt, da sich im Projekt eine fokussierte Trennung der Werkstoffe im Konsortium als effizienter ergab.

Parallel wurden Simulationswerkzeuge entwickelt, um die Materialverteilung entlang dem Bauteilquerschnitt zu ermitteln.

In Abbildung 3 zu sehen ist die Anwendung der Simulation am Beispiel eines Aluminiumbauteils. Hier konnte nachgewiesen werden, dass mit dieser Simulation der Materialauftrag, lokale Überfüllungen (rot) oder Kavitäten (blau) qualitativ vorhergesagt werden können. Das Simulationsmodell ist mit wenigen vorangegangenen Versuchen für verschiedene Prozessparameter und Werkstoffe anwendbar.

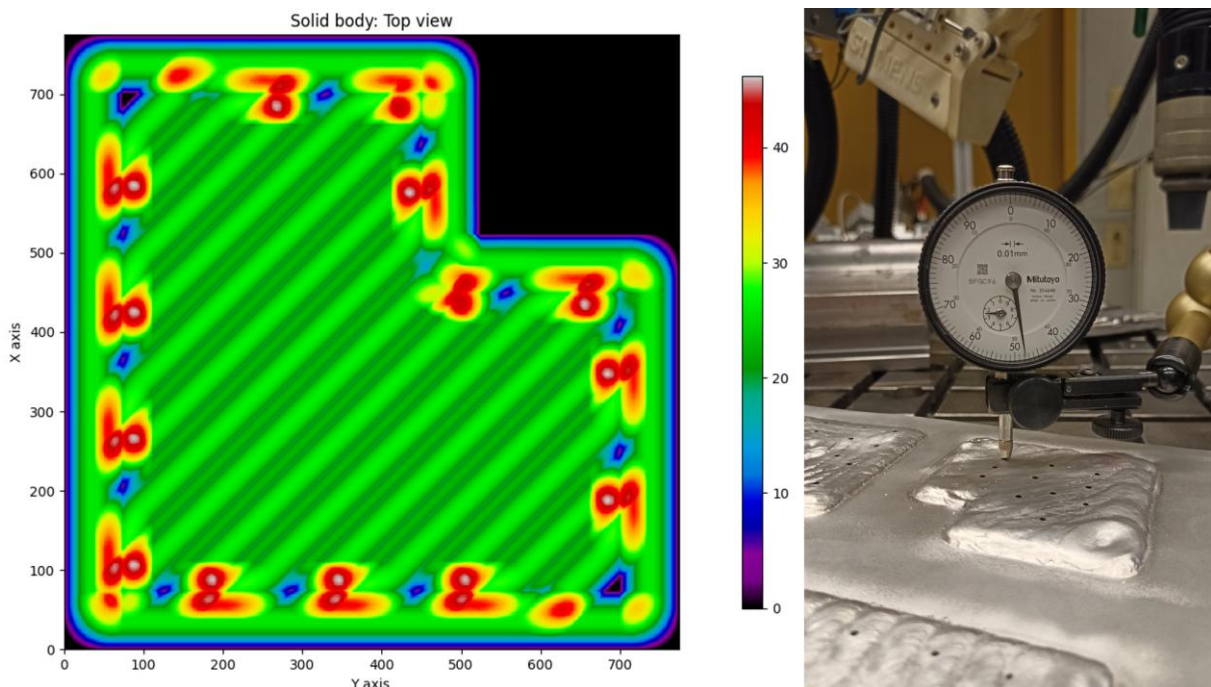


Abbildung 3: Ergebnis der Simulation mit diagonalem Füllmuster (links) und reale Messung (rechts)

Ziel des Arbeitspakets war außerdem die Erprobung zum Aufbau von *Aluminium Taylored Blanks* in der Luftfahrt durch Kombinationen unterschiedlicher Legierungen. Die vom Schweißquellenhersteller Fronius angebotenen Prozesskennlinien-Bibliothek wurde hinsichtlich Eignung für die Fertigung von *Taylored Blanks* untersucht und geeignete Prozessparameter ausgewählt. In Absprache mit Hegemann wurde der Versuchsumfang, sowie die für die Luftfahrtindustrie relevanten Legierungen definiert. Entsprechend den verfügbaren Prozessparametern wurden Versuche mit 6060 und 6063 (TiB-dotiert) durchgeführt, da diese Legierungen aufgrund ihrer Wirtschaftlichkeit und Festigkeit die lohnendste Option boten. Unter Verwendung eines 6060-Substrates können auf diese Weise Strukturbauteile in Form von *Taylored Blanks* hergestellt werden.

2.1.1.2 Arbeitspaket 1.4

Das AP 1.4 beschäftigte sich mit der Online-Prozess-QS durch integrierte Sensorik. Im AP 1.4 wurde eine Prozessüberwachung für den Prozess auf Basis von Vorarbeiten weiterentwickelt angewendet. Durch die Prozessüberwachung mittels diverser Sensorik (Spannung, Stromstärke, Drahtvorschub, Gasfluss, Schweißkamerabild) sind Rückschlüsse auf das Prozessverhalten je nach Inputparameter möglich. Besonders wurde an einem Kamerasystem für Computervision-Ansätze gearbeitet. Somit wurde der **Meileinstein M2: Detektion des Bearbeitungsabstands zuverlässig möglich** erreicht.

Zur Implementierung und Erprobung eines Kamerasystems zur Prozessüberwachung wurden eine Schweißkamera der Fa. Cavitär wie auch eine Thermokamera der Fa. Flir in der Pilotlinie in München implementiert. Die Bilder der Schweißkamera dienen zur Prozessüberwachung für den Maschinenbediener und auch zu qualitativen Prozessbewertung. Die Auswertung der Thermokamera wurde zur automatisierten Vermessung der Schmelzbadgröße und -temperatur verwendet, um auch quantitative Auswertungen und Prozessvergleiche zu ermöglichen.

2.1.2 Arbeitspaket 2

Ziel des AP 2 war die spanende Fertigbearbeitung und Technologieentwicklung zum HSC-Fräsen von Aluminium mit hochgenauen CNC-Industrierobotern.

2.1.2.1 Arbeitspaket 2.3

In Arbeitspaket 2.3 wird die Prozess- und Regelungstechnik für das hochgenaue Zerspanen von AM-Bauteilen mit Robotern entwickelt. Ziel waren Bauteile mit Fertigungstoleranzen um $\pm 200 \mu\text{m}$ zu erreichen. Dazu ist die Optimierung der Prozessparameter und Werkzeuge unter Berücksichtigung der dynamischen Stabilität des Roboters notwendig. Somit wurde der **Meilenstein M8 Technologieentwicklung HSC-Fräsen mit Robotern** abgeschlossen erzielt.

Dazu wurde die Optimierung der Prozessparameter und Werkzeuge unter Berücksichtigung der dynamischen Stabilität des Roboters erarbeitet. In Grundlagenversuchen und auch in der Fertigung komplexerer Bauteile wurden verschiedene Bahnstrategien verglichen. Insbesondere durch Verrundungen der Roboterbahn und durch horizontale statt vertikale Zustellbewegungen, ließ sich die Fräsgenauigkeit trotz der mangelnden dynamischen Stabilität des Roboters verbessern.

Im Arbeitspaket wurde die Bahngenauigkeit bei Positionierbewegungen durch Kalibrierung und Kompensationsalgorithmen optimiert, sodass eine Bahntreue von ca. $\pm 200 \mu\text{m}$ (je nach Fitting) reproduzierbar erreicht wurde. Außerdem wurden Fräsversuche mit HSS- und unbeschichteten VHM-Fräswerkzeugen durchgeführt, dabei wurde kein Schmiermittel eingesetzt. Anschließend wurden diese Versuche ausgeweitet. Neben Schaft- und Formfräsern wurden Eck- und Hochvorschubfräser mit Wendeschneidplatten verwendet um Fräsoperationen in Aluminium-Halbzeugen, sowie in additiv gefertigten Bauteilen durchzuführen. Die Zerspanung von additiv gefertigten Bauteilen stellte eine besondere Herausforderung dar, da der unbestimmte Gefügestand ohne zwischengeschaltete Wärmebehandlung eine Anpassung der Fräsparameter benötigte. Das Nachrüsten einer Minimalmengenschmierung, sowie der Einsatz von Fräs Werkzeugen aus PKD und DLC-beschichteten VHM-Werkzeugen, hat das Prozessfenster deutlich vergrößert. Es ließen sich nennenswerte Zeitspanvolumina bei guter Bahntreue und Oberflächengüte erreichen.

Beim Besäumen von Aluminiumbauteilen mit 10 mm DLC-beschichteten VHM-Schaftfräsern ließen sich lokale Werkstücktoleranzen von ca. $\pm 150 \mu\text{m}$ erreichen. Es sei darauf hingewiesen, dass diese Toleranzen in einem kleinen Verfabereich eingehalten wurden (ca. 150 mm) und damit eine erhöhte Genauigkeit gegenüber den vorhergegangenen Messungen zu erwarten war. Die entstehenden Prozesskräfte wirken sich negativ auf die Bahngenauigkeit aus und sind sehr abhängig von dem exakten Prozess, sowie der Roboterpose. Aus weiteren Versuchen mit zum Beispiel Eck- und Hochvorschubfräsern können Prozess-Richtlinien abgeleitet werden. Da diese Fräser die Prozesskräfte in unterschiedliche Richtungen lenken, lassen sich so die dynamisch belastbaren Bereiche des Roboters ausnutzen und dynamisch instabile Posen und Verfahrensrichtungen vermeiden.

Die folgenden Bilder (Abbildung 4) zeigen verschiedene Fräsoperationen, eingesetzt wurden DLC-beschichtete VHM-Fräser. Als Werkstück wurden Aluminiumhalbzeuge und in WAAM additiv gefertigte Segmente verwendet.

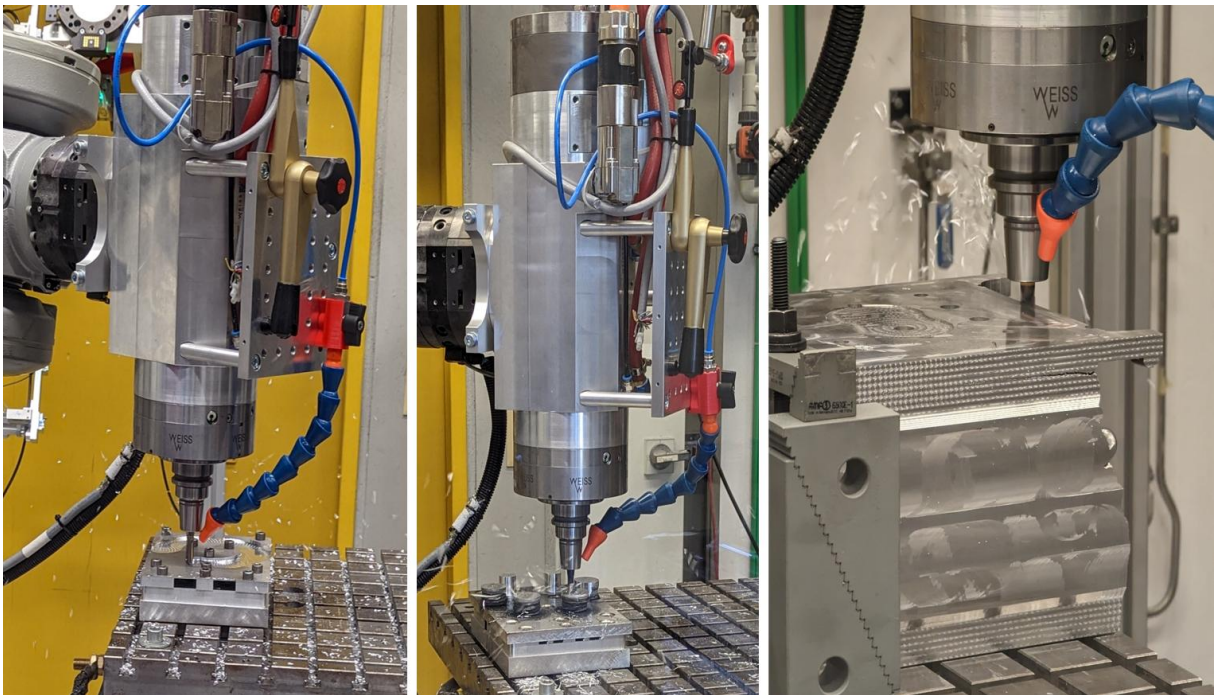


Abbildung 4: Bilder von Fräsversuchen unter Verwendung von 6 mm und 10 mm Schafffräsern

Anschließend war die Bewertung hinsichtlich Qualität, Prozesssicherheit und Standmenge durch Bearbeitungsversuche das Ziel. Mit PKD-Wendeschneidplatten in einem 40 mm Eckfräser wurden sehr gute Oberflächengüten erreicht (siehe Abbildung 5). Durch die sehr hohen Schnittgeschwindigkeiten ließ sich trotz geringer Zustelltiefe ein nennenswertes Zeitspanvolumen erreichen. Diese Parameterkombination scheint außerdem für die Roboterdynamik gut geeignet zu sein.



Abbildung 5: Plangefräste Fläche, gefertigt mit einem PKD-Fräser

Die Verwendung eines 20 mm Hochvorschubfräasers mit zwei Wendeschneidplatten hat außerdem gute Zeitspanvolumina gezeigt (siehe Abbildung 6). Die sehr hohe Vorschubgeschwindigkeit bei hohem Zahnvorschub hat sich jedoch nachteilig auf die Oberflächengüte ausgewirkt. Erwartungsgemäß ist der Hochvorschubfräser besser für Schrupp- und Vorschlichtbearbeitungen geeignet.



Abbildung 6: Oberflächengüte nach dem Eckfräsen mit einem Hochvorschubfräser

Die Bahndynamik und Verfahrgeschwindigkeiten als Ziel des APs konnten durch eine Optimierung der Bahnplanung gesteigert werden. Zusätzlich wurde ein Beschleunigungssensor an der Frässpindel montiert. Mit diesem Sensor können die Bahngenauigkeit sowie Einflussfaktoren untersucht werden. Die Messdaten des Sensors sollen nicht nur eine präventive Anpassung der Bahnplanung ermöglichen, sondern auch im Prozess die Robotergeschwindigkeit und Wartezeiten optimieren, indem ein Nachschwingen der Frässpindel zwischen ruckartigen Zustellbewegungen vermieden wird, bzw. dafür gesorgt wird, dass dieses Schwingen zwischen den Fräsbewegungen vollständig abklingen.

2.1.3 Arbeitspaket 3

Im AP3 wurde die digitale Prozesskette für den hybriden LLHAM-Prozess inkl. Zerspanungsoperationen erarbeitet. Dies gliedert sich in die folgenden Unterarbeitspakete.

2.1.3.1 Arbeitspaket 3.1

Die Entwicklung einer vollständigen virtuellen Fertigungslinie am Beispiel der hybriden Roboterzelle der Siemens AG in München erfolgte in AP 3.1.

Für den Hybrid-Aufbau bei Siemens in München wurde das Maschinenmodell eines COMAU NJ130-Roboters um die relevanten Werkzeuge für die additive und subtraktive Fertigung erweitert. Neben dem Ergänzen von Schweißkopf und Frässpindel, wurde das vorhandene Maschinenmodell um die zusätzliche Sensortechnik und Anbauteile (Schweißkamera, Kühltechnik, Temperatursensoren, Minimalmengenschmierung etc.) ergänzt. Des Weiteren wurde eine Werkzeugbibliothek für den additiven Werkzeugkopf, sowie für die diversen Fräswerkzeuge angelegt (siehe Abbildung 7).

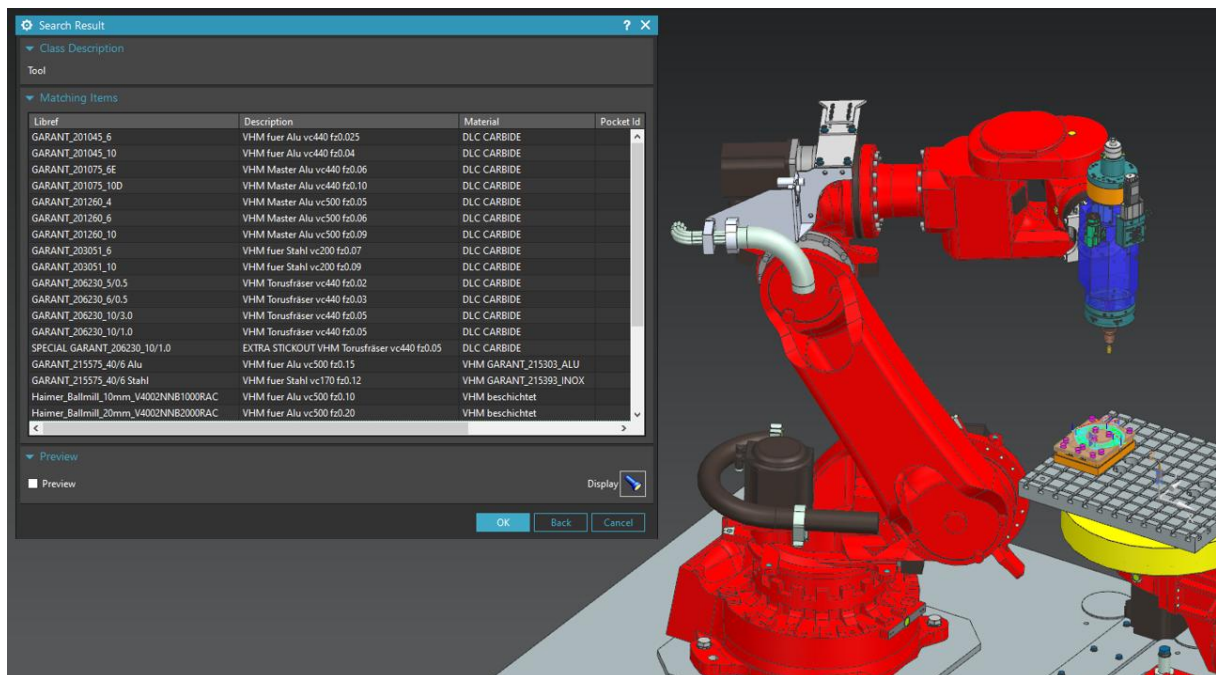


Abbildung 7: Ein Auszug aus der Werkzeugbibliothek der Roboterzelle in München

Der Postprozessor wurde um zusätzliche Funktionen für den hybriden WAAM-Prozess erweitert und ein zusätzlicher Postprozessor für die spanende Bearbeitung auf der Roboterzelle der SIEMENS AG erstellt. Mit dem Wechselsystem der Roboterzelle lassen sich so beide Postprozessoren nutzen.

Ergänzend wurde für den LLHAM-Prozess am IAPT eine eigene virtuelle Fertigungslinie konzipiert. Diese umfasst ebenfalls ein Maschinenmodell, ein Prozessmodell und einen Post-Prozessor. Eine Repräsentanz ist in Abbildung 8 zu sehen.

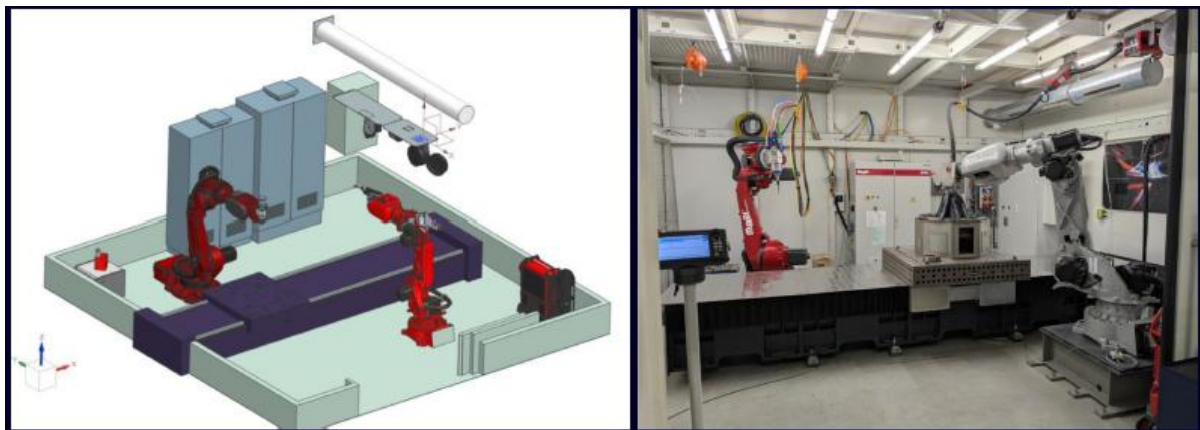


Abbildung 8: virtuelles Setup der LLHAM-Prozesstechnik am IAPT

Im Rahmen dieses APs fand die Analyse der Prozessabläufe für die AM- und Zerspanungsprozesse statt. Die CAM-Planung unter Einsatz von Siemens NX für Fräsprozesse ist ein etablierter Prozess und bietet alle gängigen Fräsoperationen an. Da die Planung von Fräsoperationen jedoch für klassische Werkzeugmaschinen vorgesehen ist, deren Steifigkeit und Prozessstabilität kaum von der Position des Werkzeuges oder der aktuellen Verfahrensgeschwindigkeit und -richtung abhängt, wurden Untersuchungen angestellt, ob diese Einflüsse in einem hybriden Prozess berücksichtigt werden müssen. In enger Zusammenarbeit mit dem IPMT der TUHH wurden Bauteile auf der Roboterzelle der Siemens AG gefertigt und Oberflächengüten, sowie Maßtoleranzen durch das IPMT bewertet. Als Ergebnis wurde eindeutig festgestellt, dass die Oberflächengüte und Steifigkeit stark mit der Pose des Roboters, sowie Verfahrenrichtung und Gleichlauf- oder Gegenlauf-Fräsen zusammenhängen. Eine Möglichkeit, diese Einflussgrößen zur Optimierung der Fräsgüte zu manipulieren, liegt in der etablierten digitalen Prozesskette nicht vor. Die Prozessabläufe für die additive Fertigung wurden ebenfalls betrachtet,

dabei wurde die fehlende Prozesskontrolle in der CAM-Planung als besonders hervorstechende Lücke festgestellt. Es wurden Simulationswerkzeuge, sowie eine Prozessregelung entwickelt, die basierend auf Prozesswissen und eigens geführten Parameterstudien an jedem Punkt des Bauteils möglichst optimale Prozessparameter vorschreiben. Diese Werkzeuge haben eine deutliche Steigerung der Prozessstabilität und eine verbesserte Genauigkeit der geometrischen Genauigkeit und Vorhersagbarkeit bewirkt. Aufgrund des Umfangs der Simulationswerkzeuge und Prozessregelung wurde von einer nahtlosen Integration in die CAM-Planung abgesehen. Daher Bedarf die Anwendung dieser Technologie einen geringen Mehraufwand in der Arbeitsvorbereitung. Durch reduzierte Iterationszahlen, Ausschuss-Vermeidung und gesteigerte Prozessstabilität bei vergleichsweise wenig Mehraufwand ist dieses Verfahren bei unabhängig von Bauteilgröße und Komplexität lohnend.

Aufbauend darauf wurde eine Ableitung digitaler Hohlräume entlang der Prozessabläufe durchgeführt. Das Ergebnis war, dass insbesondere die Zerspanung auf präzise vorhergesagte bzw. real gemessene Geometrien angewiesen ist und die Rückführung eben dieser Messwerte insbesondere bei komplexeren Bauteilformen großen Mehraufwand in der Konstruktion und CAM-Planung benötigt. Dieses Problem konnte zum einen für einfache Bauteile durch das in-situ Vermessen und Auswerten von hochfrequenten Prozessdaten, sowie zum anderen für komplexere Bauteile durch eine hinreichend genaue geometrische Simulation teils gelöst werden. Die Integration und Analyse der Messwerte, sowie die Simulation sind nicht vollständig in die CAM-Planung integriert und benötigen so weiterhin zusätzlichen Arbeitsaufwand. Die Qualität der Vorhersage und damit die Zuverlässigkeit der CAM-Planung von Zerspanungsprozessen konnte jedoch verbessert werden, genauso wurden der Arbeitsaufwand in der Arbeitsvorbereitung und Iterationszyklen in der Fertigung durch Verwendung dieser Werkzeuge reduziert.

Auf Basis dieser Analyse fand die Entwicklung einer integrierten digitalen Wertschöpfungskette statt. Das Maschinenmodell wurde auf den hybriden Prozess adaptiert und bildet damit die Grundlage für eine tiefere Integration der digitalen Wertschöpfungskette mit den oben genannten optionalen Werkzeugen. Anhand von diversen Bauteilen wurde das Zusammenspiel der additiven und subtraktiven Prozesse getestet und optimiert.

Mit verschiedener Messtechnik (z. B. Laserscanner) wurden additiv gefertigte Bauteile vermessen. Die so erfassten Daten können in die CAM-Planung zurückgeführt werden, um diese basierend auf der Ist-Geometrie des Bauteils anzupassen.

Das Maschinenmodell wurde wie in Arbeitspaket 3.1 beschrieben erweitert. Mit diesen zusätzlichen Informationen ist es in der CAM-Planung möglich, Kollisionen und Störkonturen im additiven und subtraktiven Prozess zu erkennen und Prozessanpassungen zur Vermeidung dieser vorzunehmen.

Das erstellte Maschinenmodell ist somit in der Lage hintereinandergeschaltete AM- und Zerspanprozesse zu simulieren. Dabei werden sowohl die im AM-Prozess aufgebaute Geometrie als auch das beim Fräsen zerspante Volumen in jedem Prozessschritt aktualisiert. Die so erzeugte Geometrie (das „*In-Process Workpiece*“) erlaubt nicht nur die Kollisionsprüfung zwischen Werkzeug, Spannmitteln, Maschinentisch und Umgebung. Zusätzlich lassen sich auch Kollisionen mit der, je nach Prozessschritt variablen, Bauteilgeometrie feststellen.

Es wurden zunächst zwei Postprozessoren für den hybriden WAAM- und Fräsprozess der Anlage entwickelt. Es ist abhängig von dem Operationstyp (additiv/subtraktiv) möglich zwischen den zwei Postprozessor-Konfigurationen zu wechseln. Eine Zusammenführung in einen gemeinsamen -hybriden- Postprozessor wurde für die Fertigungszelle der SAG und des IAPT umgesetzt. Beide Postprozessoren konnten getrennt voneinander validiert und erweitert werden. So umfasst der Postprozessor für den LLHAM-Prozess zum Beispiel Optimierungen für das unterbrechungsfreie Schweißen zwischen Segmentübergängen, sowie Unterprogramme für Mess- und Kühlabläufe.

Das Maschinenmodell des IAPT wurde mit Unterstützung der Siemens AG aufgebaut. Für das Schweißen von Titan wurde keine Alternative zu der gekapselten Schutzgas-Kammer gefunden. Damit ist die Durchführung von Titan-Versuchen nur in Verbindung mit großen Hardware-Änderungen in bei Siemens möglich. Um die Zielerreichung unter den Budgetvorgaben möglichst sinnvoll zu unterstützen, wurde sich gegen den Aufbau einer Schutzgaskammer in München entschieden, da der benötigte Zeit- und Materialaufwand in der Unterstützung des IAPT besser genutzt ist.

Durch die Software-Erweiterung NX-Open lassen sich eigene Programme und Skripte in der CAM-Umgebung von Siemens NX und damit dem hybriden Maschinenmodell und der digitalen Wertschöpfungskette ausführen. Die Software in NX-Open kann zum Beispiel für trapezoide oder sinus-förmige Mäanderbahnen verwendet werden und erleichtert damit den Transfer von Forschungsergebnissen aus anderen Robotersystemen, in denen Vorversuche durchgeführt wurden.

2.1.3.2 Arbeitspaket 3.2.

Ziel des AP 3.2 ist die Erfassung der additiven Ist-Geometrie zu einem digitalen Zwilling. Dieser wird für eine exakte Beschreibung der Realgeometrie für die CAM-Planung für die Zerspaltung verwendet. Dazu soll die Entwicklung eines Konzepts zur Ableitung der Ist-Geometrie bezüglich geometrischer Fehler als Basis vorgenommen werden. Es wurde ein Laserscanner am WAAM-Kopf integriert, um die Realgeometrie während bzw. nach dem additiven Prozess zu scannen. Basierend auf den Scan-Ergebnissen kann das 3D-Modell für die Planung der Fräsbearbeitung angepasst werden. Außerdem können Punkt-, Linien und Flächenmessungen genutzt werden, um den WAAM-Prozess zu beeinflussen: so ließe sich der Prozess bei einer unzulässig großen Maßabweichung abbrechen, einzelne Schichten können weggelassen oder ergänzt/wiederholt werden, um die gewollte Bauteilhöhe zu erreichen. Gezeigt in Abbildung 9 ist der Aufbau inkl. Schweißkamera Cavitar C300.

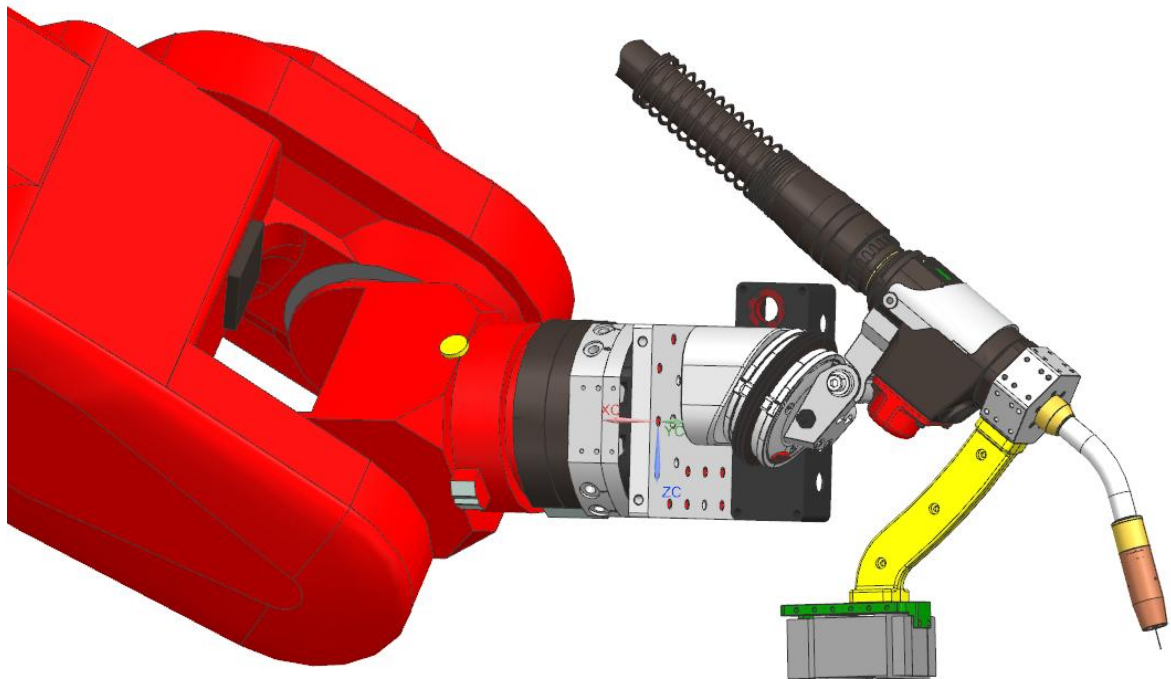


Abbildung 9: WAAM-Kopf für die Fronius TPS-500-i Schweißquelle inkl. Sensortechnik (Cavitar C300)

Durch den Vergleich verschiedener Messverfahren und dem Analysieren von Prozessparametern und Simulationsergebnissen, wurde eine breite Spanne an Lösungsmöglichkeiten für die Erfassung der Realgeometrie untersucht. Dabei waren insbesondere das Zusammenfassen von Messergebnissen und Prozessgrößen hin zu wenigen Zielgrößen eine erfolgreiche Methode. An einem Beispiel-Bauteil wurde die zuletzt additiv gefertigte Schicht an relevanten Punkten vermessen, basierend auf dieser Punktwolke wurde die Bauteilhöhe ermittelt. Dieser singuläre skalare Wert war zusammen mit den hochfrequent dokumentierten Prozesswerten (Robotervorschub, Drahtvorschub) bereits ausreichend, um für dieses Bauteil eine hinreichend genaue Real-Geometrie Beschreibung zu ermöglichen und so anschließende additive und subtraktive Prozesse, sowie das Qualitätsmanagement zu beeinflussen.

Weiterhin wurde die Anpassung der Sensoren für Echtzeit-Prozessmessungen vorgenommen. Im Projekt wurde eine Vielzahl von Sensoren eingesetzt, um den Prozess in Echtzeit zu erfassen. Schwerpunkte der Datenverarbeitung waren die Anomaliedetektion sowie die Prozessregelung und -dokumentation.

So wurde zum Beispiel eine Schweißkamera (Cavitar C300) verwendet, um den Stickout zu erfassen. Das Kamerabild steht nicht nur dem Maschinenbediener zur subjektiven Prozessbewertung zur Verfügung, sondern wird mit KI-Verfahren ausgewertet. Basierend auf einer Sollwertvorgabe gemäß der CAM-Bahnplanung wurde so eine Prozessregelung realisiert, die in Echtzeit auf Geometrieabweichungen und Defekte reagieren kann.

Zusätzlich wurden Versuche unternommen, die basierend auf den Kamerabildern, dem ermittelten Stickout entlang der Werkzeugbahn, sowie mit dem (idealen) 3D-Modell, die Ist-Geometrie abzuleiten. Die dazu verwendeten KI-Methoden blieben jedoch mangels Trainingsdaten erfolglos.

Andere Verfahren (z.B. 3D-Laserlinienscanner oder der Einsatz von Tastköpfen) scheinen vielversprechender und werden bzw. wurden weiter untersucht. Zusätzlich wurden Simulationen basierend auf experimentell ermittelten Kennlinien entwickelt, welche das Potential bieten die Ist-Geometrie hinreichend genau vorherzusagen. Die für die Simulation notwendigen Kennlinien wurden basieren auf der alten Schweißquelle ermittelt. Mit der neuen Schweißquelle stehen weiter (hochfrequente) Prozessdaten zur Verfügung, welche eine Erweiterung und Präzisierung der Simulation versprechen.

In diesem AP wurde abschließend die Ableitung der digitalen Wertschöpfungskette auf Basis der tatsächlichen Geometrie vorgenommen. Die unternommenen Tests und Untersuchungen haben gezeigt, dass eine Erfassung der Ist-Geometrie und Rückführung in die CAM-Planung möglich ist und Prozessverbesserungen ermöglicht. Hervorzuheben ist die Vermeidung von Leerfahrten (Fräsbewegungen, bei denen kein Material zerspant wird), sowie umgekehrt die Vermeidung von Fräsbearbeitungen mit zu großer Zustellung, welche beide aufgrund von falsch vermuteten Rohteilgeometrien häufig vorkommen.

Im Rahmen dieser Arbeit sind neue Ansätze entstanden, die Werkzeugbahnen basierend auf Messdaten (Ist-Geometrie) und dem 3D-Modell bzw. vergleichbaren Kontextinformationen zu optimieren.

Das Wiederholen oder Weglassen eines WAAM-Layers basierend auf Höhenmessung ist ein bereits bekannter Ansatz. Insbesondere in Großstrukturen, topologieoptimierten Bauteilen und bei höheren Anforderungen an die Maßhaltigkeit und Oberflächengüte, ist diese Umsetzung nicht ausreichend und die Hinzunahme von Kontextinformationen ist essenziell. Eben diese Kontextinformationen werden durch die digitale Wertschöpfungskette in Form von z.B. Geometrieinformationen bereitgestellt.

Der Aufbau der Visualisierung des digitalen Zwillinges war ebenfalls das Ergebnis dieses APS. Der digitale Zwilling wird auf zweierlei Arten visualisiert. Das erweiterte Maschinenmodell der Roboterzelle der SIEMENS AG erlaubt eine präzise Vorschau und Simulation der Roboterbewegungen. Weitere Technologien wie die Simulation von Prozesskräften in der Zerspaltung und deren Auswirkung auf die Roboterkinematik wurden untersucht.

Zusätzlich zu dieser CAD-basierten Visualisierung, erlaubt das hochfrequente Aufzeichnen von Prozessdaten die Darstellung des Bauteils als Punktwolke. Die Punkte umfassen dabei diverse Sensordaten, sowie deren verarbeiteten Ergebnisse (z.B. KI-basierte Erkennung des Stickout oder die basierend auf Strom- und Spannungsmessungen ermittelte Streckenenergie als Maß der Wärmeeinbringung). Die in der Punktwolke erfassten orts- und zeitabhängigen Daten können zusätzlich zur Anomaliedetektion und -lokalisierung verwendet werden.

Nach dem Aufbau der Wertschöpfungskette wurde die Validierung der digitalen Wertschöpfungskette für hybrides AM durchgeführt. Die digitale Wertschöpfungskette konnte in Segmenten bereits in der additiven Fertigung von mehreren größeren Bauteilen getestet werden. Der Wechsel des WAAM-Kopfes durch einen LLHAM-Kopf, sowie die anderen Achsen, Roboter und Freiheitsgrade der IAPT-Roboterzelle gegenüber dem Anwendungsbeispiel der Roboterzelle der SIEMENS AG benötigen eine Anpassung und Erweiterung des Maschinenmodells, Postprozessors und Steuerungstechnik. Die bisherigen Erfahrungen im WAAM-Prozess lassen jedoch darauf schließen, dass sich die bisher erarbeitete digitale Wertschöpfungskette mit vergleichsweise wenig Aufwand an die IAPT-Roboterzelle anpassen lässt.

2.1.3.3 Arbeitspaket 3.3

Ziel des Arbeitspaket 3.3 ist die Simulation der AM- und Zerspaltungsprozesse. Das in dem Berichtszeitraum vervollständigte Maschinenmodell inkl. der kinematischen Kette bildet die Grundlage für Simulationen der Maschinendynamik. Eine Simulation des Materialauftrags im LLHAM-Prozess wurde entwickelt und erfolgreich eingesetzt, um schon während der CAM-Planung Risikobereiche und Defektstellen im AM-Bauteil zu identifizieren. Dieses Simulationswerkzeug beschränkt sich jedoch aktuell noch auf den reinen WAAM-Prozess, ohne Laserunterstützung. Gezeigt sind die Simulationsergebnisse einer typischen 3-Achs Werkzeugbahn sowie das Simulationsergebnis der 5-Achs Werkzeugbahn, bei der die Prozessparameter und Werkzeugwinkel bauteilbezogen optimiert wurden (Abbildung 10). Das dritte Bild zeigt das Endergebnis. Es fällt auf, dass selbst steile Wände ohne ein Absacken der Schweißnaht gefertigt werden können.

Meilenstein M11: Intelligente modellbasierte Prozesssimulation in der digitalen Wertschöpfungskette

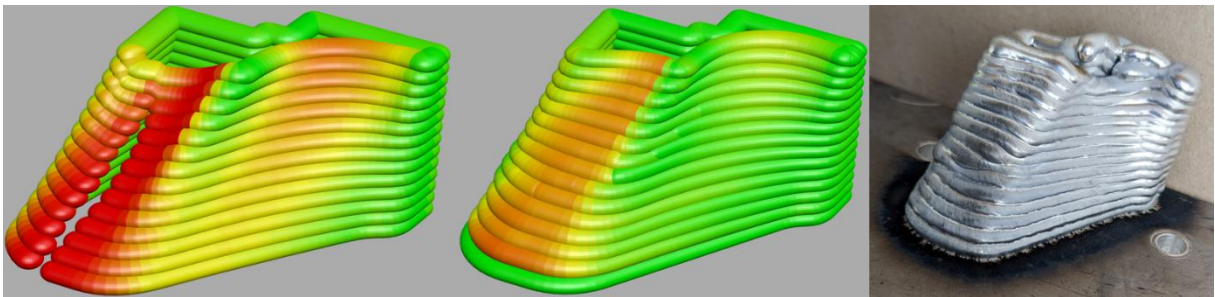


Abbildung 10: Simulation von verschiedenen Bahnstrategien und Prototyp, gefertigt mit der optimierten Werkzeugbahn

Im AP wurde der Aufbau des Maschinenmodells für die Prozesssimulation vorgenommen. Das Maschinenmodell wurde um die Frässpindel und -werkzeuge ergänzt. Das Modell des Roboters enthält die notwendigen Geometrieinformationen, um die Steifigkeit der einzelnen Gelenke bewerten zu können. Steifigkeit, Umkehrspiel und andere kritische Eigenschaften der Antriebe und Getriebe gehen aus diesem Modell allerdings nicht hervor.

Zudem war die Entwicklung von Simulations-Ansätzen für hybride Prozessumgebungen Ziel des APs. Es wurde ein neuer Ansatz zur Simulation des Materialauftrags für den WAAM-Prozess erarbeitet. Die entwickelte Simulation hat einen reduzierten Umfang, thermische Einflüsse, Eigenspannungen und damit einhergehend Verzug werden nicht simuliert. Durch diese Reduktion lässt sich die Simulation jedoch flexibel und ohne detaillierte Anlagenkenntnisse (z.B. Wärmeabführung durch Umgebung, Maschinentisch, ...) anwenden und produziert mit Blick auf die geometrische Genauigkeit des WAAM-Prozesses hinreichend genaue Simulationsergebnisse. Die beschriebene Simulation wird in die CAD/CAM-Umgebung integriert, um somit ein fester Bestandteil der digitalen Wertschöpfungskette und des digitalen Zwillings zu werden. Eine Erstellung eines LLHAM-Prozessmodells zur simulativen Bestimmung von Temperatur- und Eigenspannungsverteilung sowie Anbindung an den digitalen Zwilling war ursprünglich Ziel des APs. Die Entwicklung eines LLHAM-Prozessmodells wurde zurückgestellt, da diese Erfahrungswerte und Messdaten der IAPT-Roboterzelle benötigt, welche sich für den Großteil des Projektzeitraumes noch im Aufbau befand.

Parallel fand die Entwicklung der intelligenten Zerspanungssimulation für geometrieindividuelle AM-Bauteile statt. Die Zerspankraftsimulation in NX wurde im Berichtszeitraum in enger Zusammenarbeit mit dem IPMT weiter untersucht. Dabei geht es insbesondere darum die für AMAvia benötigten Werkstoff- und Werkzeug-Paarungen in die Simulation einzupflegen, um belastbare Simulationsergebnisse zu erhalten. Eine Vielzahl von Fräsversuchen in Aluminium wurde vom IPMT unter Verwendung eines Kraftsensors durchgeführt. Die Messergebnisse wurden auf die von der Zerspankraftsimulation benötigten Kennzahlen zurückgeführt, um die Zerspankräfte für ähnliche Operationen zu berechnen. Ziel ist es dabei, die Prozesskräfte in der CAM-Planung für eine Visualisierung der Prozessstabilität beim Roboterfräsen zu verwenden. Außerdem konnten optional die Prozesskräfte in den G-Code exportiert werden, um eine darauf basierende Bahnkorrektur (z.B. Durchbiegung Roboterarm, Durchbiegung dünnwandiges Bauteil) durchzuführen.

Die in Abbildung 11 gezeigte „H-Probe“ ist eine von der Fa. Heggemann häufig verwendete Geometrie, um die Werkstoff- und Prozesseigenschaften verschiedener Verfahren, darunter WAAM, zu untersuchen. Die Geometrie wird in diesem Anwendungsbeispiel mit einem Schafffräser besäumt, die dabei entstehenden Zerspankräfte sind farblich entlang dem Werkzeugweg aufgetragen. Lokale Kraftmaxima in den innenliegenden Ecken, sowie reduzierte Schnittkräfte an äußeren Ecken sind erkennbar. Die Schnittkraft-basierte Optimierung soll an diesen kritischen Stellen die Prozessparameter verändern, um eine gleichmäßige Prozesskraft und damit Prozessstabilität bei maximaler Produktivität zu gewährleisten.

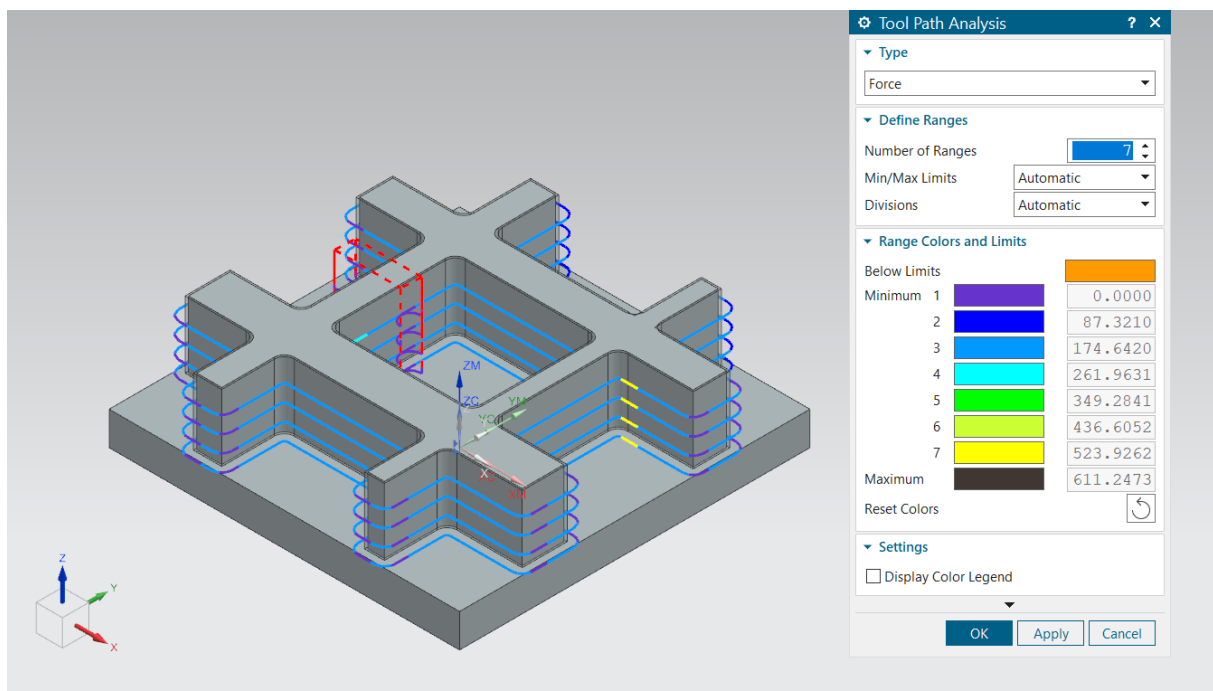


Abbildung 11: Zerspankraftsimulation am Anwendungsbeispiel „H-Probe“

Die Erstellung von Stabilitätskarten und Einbindung in die Zerspanungssimulation zur Abbildung des dynamischen Maschinenverhaltens wurde zudem erarbeitet. Ergänzend zu den Untersuchungen am IPMT wurden im Rahmen dieses Arbeitspakets auch Messungen am Versuchsaufbau bei Siemens durchgeführt. Analog zur Vorgehensweise am IPMT wurden dabei verschiedene Positionen des Werkstücks innerhalb des Roboterarbeitsraums ausgewählt und die resultierenden Schwingungen während des Fräsprozesses mittels eines Beschleunigungssensors aufgezeichnet. Im Anschluss an die Bearbeitung wurden die Proben zur Charakterisierung der Oberflächenrauheit mit einem Tastschnittgerät GD120 am IPMT vermessen. Der Versuchsaufbau bei Siemens ist in Abbildung 12 schematisch dargestellt.

Die Analyse der Ergebnisse bei Siemens führte zu folgenden vorläufigen Handlungsempfehlungen:

- Präferenz für das Gegenlaufräsen.
- Vermeidung niedriger Zahneingriffsfrequenzen.

- Bevorzugung des Gleichlaufränsens entlang der X-Achse (vgl. Abbildung 12).

Ein direkter Vergleich der Ergebnisse zwischen dem Versuchsaufbau am IPMT und dem bei Siemens offenbart signifikante Unterschiede hinsichtlich der präferierten Bearbeitungsstrategien. Während die Wahl des Gegenlaufränsens bei geringen Drehzahlen auch am IPMT vorteilhaft war, zeigte sich bei hohen Drehzahlen eher Gleichlauf als stabilere Option. Ähnliche Diskrepanzen traten bei der bevorzugten Bearbeitungsrichtung auf: Entlang der X-Achse, die sich bei Siemens als günstig erwies, tendierte der Prozess am IPMT eher zum Rattern.

Eine mögliche Erklärung für diese Divergenzen liegt in den fundamental unterschiedlichen Robotermodellen und insbesondere in der Tatsache, dass die Roboterzelle bei Siemens nicht primär für die spannende Bearbeitung ausgelegt ist, was zu einer insgesamt höheren Systemnachgiebigkeit führt. Während am IPMT zwischen Rattern der Roboterstruktur bei niedrigen Drehzahlen und Rattern der Werkzeug-Spindel-Baugruppe bei hohen Drehzahlen differenziert werden konnte, dominierte bei Siemens das Rattern der nachgiebigen Roboterstruktur über den gesamten untersuchten Drehzahlbereich. Diese Beobachtungen legen nahe, dass ein direkter Vergleich der Stabilitätsgrenzen nur bedingt möglich ist und die unmittelbare Integration der Handlungsempfehlungen in die NX-Simulationsumgebung möglicherweise nicht zielführend ist. Die systemspezifische Identifikation von Stabilitätskarten und die darauf basierende Auswahl der produktivsten und gleichzeitig stabilen Schnittparameter erweist sich somit weiterhin als die robusteste Methode, um eine wirtschaftliche und prozesssichere Zerspanung zu gewährleisten.

Das Arbeitspaket 3.3 „Simulation der AM- und Zerspanungsprozesse“ wurde mit dem Erreichen des **Meilensteins 12** „Intelligente modellbasierte Prozesssimulation in der digitalen Wertschöpfungskette“ erfolgreich abgeschlossen.

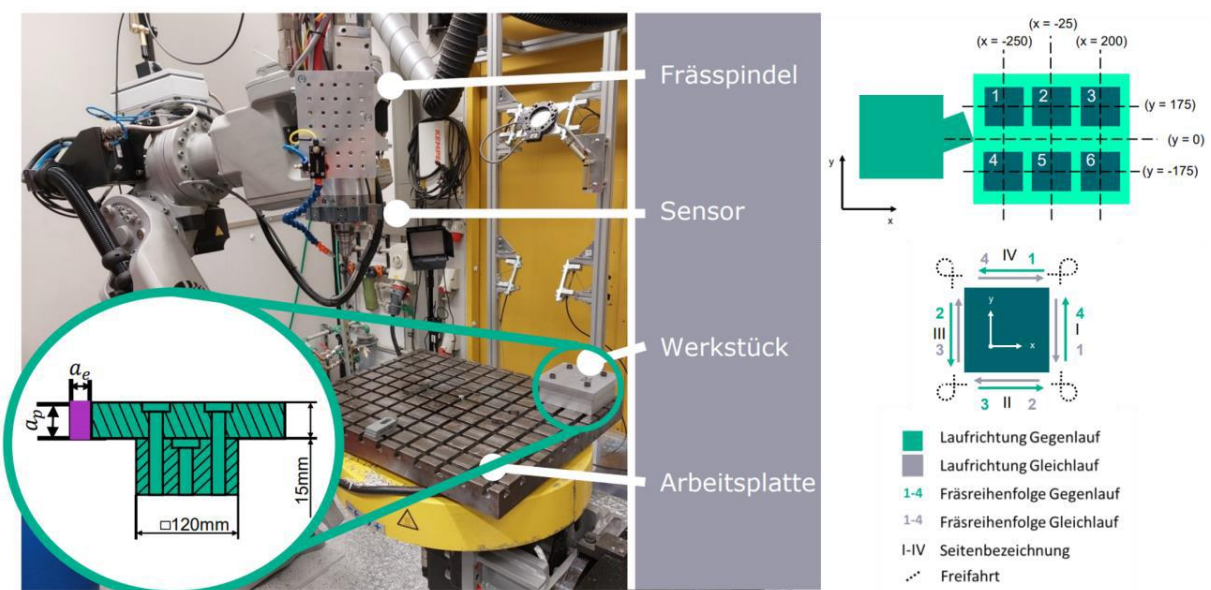


Abbildung 12: Versuchsaufbau zur Bestimmung von Stabilitätskarten bei verschiedenen Werkstückpositionen & Roboterposen beim Projektpartner Siemens.

2.1.3.4 Arbeitspaket 3.4.

Das Arbeitspaket 3.4 hatte das Ziel adaptierbare NC-Programme zu entwickeln, mit deren Hilfe eine Online-Korrektur der Fräsbahn basierend auf Sensordaten erfolgen kann. Ziel war es festzustellen, welche Anpassungen im NC-Programm eine verbesserte Fräsbahn generieren würden. Mit diesen Erkenntnissen lassen sich die CAM-Planung sowie der Postprozessor anpassen, um adaptierbare NC-Programme zu erzeugen.

Zusätzlich wurde die Abdrängung dünnwandiger Aluminiumbauteile unter Einwirkung der Zerspanungskräfte als Problem hervorgehoben. Eine Anpassung der NC-Programme, um diese Defektursache zu kompensieren, konnte im Berichtszeitraum noch nicht umgesetzt werden.

Das Erstellen von adaptiven NC-Programmen ist unter Verwendung von NX-Open und durch Anpassungen des Postprozessors möglich. Anpassungen von NC-Programmen, z.B. das Optimieren von Prozessparametern für die Additive Fertigung wurden erfolgreich umgesetzt. Somit wurde der **Meilenstein M12**: „*Adaptive Programme erstellt und getestet*“ erfolgreich abgeschlossen.

2.1.4 Arbeitspaket 4

Ziel des HAP 4 ist die Erprobung und Inbetriebnahme der virtuellen Fertigungslinie.

2.1.4.1 Arbeitspaket 4.1.

Gesamtziel des AP 4.1 ist die Erprobung und Inbetriebnahme der virtuellen Fertigungslinie. Der **Meilenstein M13** *Virtuelle Inbetriebnahme auf Basis von CAD-Modellen* wurde erreicht, wie im Folgenden dargelegt.

Dazu fand der Aufbau eines CAD-CAM-Modells anhand von Referenzbauteilen statt. Es wurde das IAPT durch Siemens beim Aufbau des CAD/CAM Modells unterstützt. Damit ist die Planung von AM- und Fräsprozessen rein digital bereits möglich. Im bilateralen Austausch wurden die Postprozessor-Konfigurationen der hybriden Roboterzelle in München erklärt und Funktionen, sowie Limits der aktuellen Postprozessoren hinsichtlich der Anforderungen des IAPT abgeleitet. Der Post-Prozessorumfang verfügte schließlich über Funktionen über additive/subtraktive/hybride Fertigung, 2.5D-/3D-/Multiachs-Bearbeitung, Einstellen von Schweißparametern und Auslesen von Prozessdaten. In Summe konnte damit die die Virtuelle Inbetriebnahme und Funktionstest auf Basis von Zerspanungskräften erarbeitet werden.

2.1.4.2 Arbeitspaket 4.3

AP 4.3 hatte die Validierung der entwickelten Prozesse an Funktionsmustern von Großstrukturen zum Ziel. Der **Meilenstein M15 Funktionsfähigkeit der hybride Fertigungszelle durch Erreichung geforderter Materialeigenschaften und Oberflächenwerte nachgewiesen** wurde dabei erzielt.

Für die Validierung der gesamten Prozesskette wurden Beispiel-Bauteile und Anforderungen an Bauteilgeometrien definiert, um alle Arbeitsinhalte in einem Gesamtsystem validieren zu können. Die Anforderungen an die Bauteile umfassen dabei unter anderen:

- Variable Wandstärken von einzelnen Schweißnahtbreiten bis größeren Mäandersegmenten
- Multi-Achs Strukturen mit Überhängen, Hinterschnitten, Hohlräumen und räumlich gekrümmten Flächen
- Sowohl Großvolumige Bauteile und Substrate als auch schmale, dünnwandige Segmente, die hohe Anforderungen an das Temperaturmanagement stellen um Anbindungsfehler in kalten Segmenten, sowie Überhitzung zu vermeiden
- Prozesskombination WAAM und Fräsen unter Zuhilfenahme geeigneter Fräswerkzeuge (z.B. PKD), welche keine Ölschmierung und damit Kontamination des Substrates benötigen
- Integration von in-situ Prozessregelung unter Verwendung von Prozessdaten wie z.B. Schweißstrom, Schweißspannung, Drahtvorschub, Robotergeschwindigkeit, Spindelvibration, Bauteiltemperatur, Schnittkräften und Zwischenlagengeometrie.

Dazu wurde die Erstellung der Maßnahmen zur Realisierung des Prüfkonzepts aus AP 5.3 vorgenommen. Die oben genannten Aspekte wurde in einem Prüfkonzept in Rücksprache mit Heggemann umgesetzt. Ziel ist die Validierung der Projektergebnisse anhand eines Funktionsmusters. Die CAD-Konstruktion des Musters ist in Abbildung 13 dargestellt.

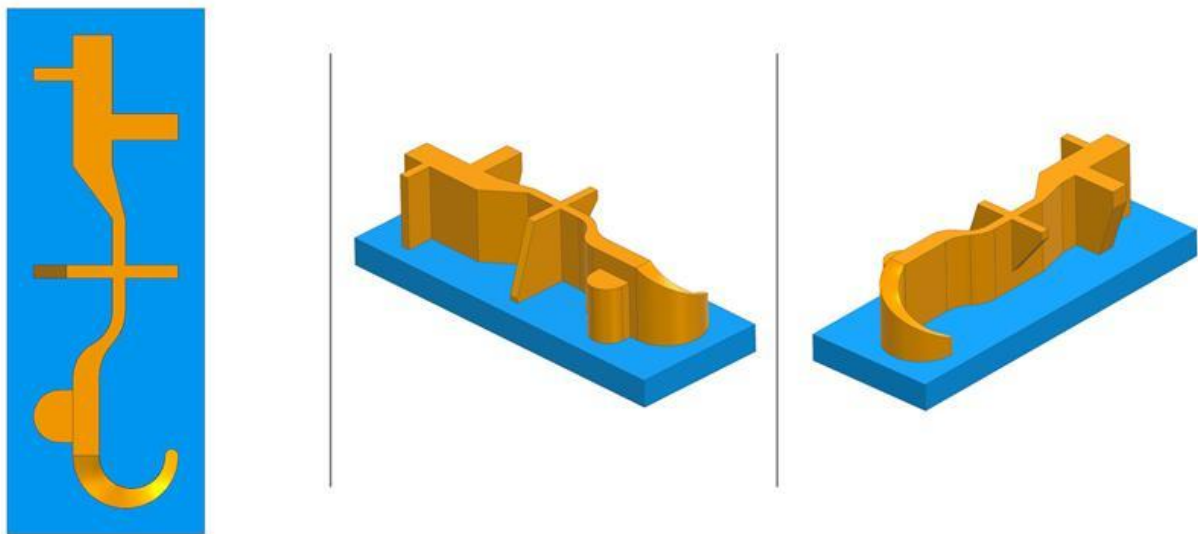


Abbildung 13: CAD-Konstruktion des Funktionsmusters (Maße 500 x 200 x 100 mm³)

Basierend darauf fand die Erprobung der Daten- und Bauteilübergabe und Fertigung von Grundkörpergeometrien anhand des integrierten Funktionsmusters statt. Dieses kann als Prüfgeometrie für das finale Prüfkonzept verwendet werden. Anschließend fand eine Optimierung der Teilsysteme zur additiven Fertigung und zur roboterbasierten Zerspanung statt. Dazu gehörte die Entwicklung eines Versuchsplanes und Durchführung der Testschweißungen und Zerspanungsversuche an Grundkörpergeometrien am IAPT sowie die Erprobung der Daten- und Bauteilübergabe. Diese boten die Grundlage für eine Optimierung der Teilsysteme und von Versuchen der Anlagentechnik am gewählten Funktionsmuster. Darauf folgend fanden die Versuche der Anlagentechnik am gewählten Funktionsmuster statt. Das IAPT wurde hierbei mit der digitalen Werkzeugkette unterstützt, um dortige Funktionsmuster aufzubauen. Die Werkzeugkette umfasste die Maschinensimulation, das CAD und das CAM sowie das Post-Processing des Pfades in einen maschinenlesbaren Code.

Abschließend wurden die Partner bei der Bewertung, Dokumentation und Nutzbarmachung der Ergebnisse aus der Fertigungsdemonstration der Fertigungszelle unterstützt. Zudem wurden Daten und Informationen für eine Life-Cycle-Kostenbetrachtungen geliefert. Bereitgestellte Informationen waren die

jeweiligen Prozesshaupt- und Nebenzeiten für die betrachteten Bauteile, Prozessparameter und Werkstoffinformationen für Draht und Substrate. Die Analysen wurden danach vom IAPT und vom Endanwender Heggemann vorgenommen.

2.1.5 Arbeitspaket 5

Ziel dieses Arbeitspakets ist die Erstellung eines Anforderungsprofils an Maschinenqualifizierung, Prozess-Validierung und Zertifizierung neuer Technologien in der Luftfahrt für Aluminium und Titan. Das IPMT unterstützte den Konsortialführer Heggemann vorrangig mit relevanten Prozessanforderungen für die Qualifizierung der Zerspanungstechnologie.

2.1.5.1 Arbeitspaket 5.1

Die Qualifizierung additiv gefertigter Luftfahrtstrukturbauteile erfordert einen umfassenden Ansatz, der sowohl die Fertigungsanlagen als auch das Personal und die eingesetzte Robotik berücksichtigt. Im Bereich der Maschinenqualifizierung sind Aspekte der Anlagenzulassung gemäß DIN EN ISO 22827 relevant, da diese Normen Abnahmeprüfungen für die mechanischen Bewegungseinrichtungen von Lasersystemen definieren, die auch in der spanenden Nachbearbeitung Anwendung finden können.

Die Personalausbildung umfasst neben dem Laserschutzbeauftragten auch die Prüfung von Roboterbedienern, idealerweise inklusive Programmierlehrgängen. Zudem ist eine prozessspezifische Fachkunde, die regelmäßig aufgefrischt wird, unerlässlich. Ein zentraler Punkt für die spanende Nachbearbeitung ist die Qualifizierung der eingesetzten Roboter. Hier müssen herstellerabhängige Prüfungen durchgeführt und Toleranzfenster prozessspezifisch festgelegt werden. Die Synchronisierung der Roboterbewegungen sowie die Kalibrierung der zugehörigen Sensoren sind entscheidend für präzise Bearbeitungsergebnisse. Diese Kalibrierungen müssen nicht nur in regelmäßigen Abständen, sondern auch bei besonderen Vorkommnissen wie dem Austausch von Resolverwerten oder dem Verlust des Speicherinhalts des Umdrehungszählers erfolgen.

Obwohl der Fokus primär auf der additiven Fertigung liegt, sind auch Aspekte der zerstörungsfreien Prüfung (NDT) relevant, um die Integrität der Bauteile nach der Nachbearbeitung sicherzustellen. Hier kommen in der Luft- und Raumfahrt primär die EN 4179 / NAS 410 sowie die Sichtprüfung nach ISO 19828 zur Anwendung.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Qualifizierung für die additive Fertigung von Luftfahrtstrukturbauteilen auch wesentliche Aspekte für die spanende Nachbearbeitung beinhaltet. Dies betrifft insbesondere die Anlagenzulassung, die Ausbildung des Bedienpersonals im Umgang mit Robotern und die präzise Kalibrierung und Überwachung der Robotersysteme selbst.

2.1.5.2 Arbeitspaket

AP 5.4 beinhaltet die Zusammenfassung und Bewertung des Gesamtergebnisses. Die realisierte Zelle sowie das Konsortium sind in Abbildung 14 und 15 gezeigt.

Das Forschungsprojekt hat seine übergeordneten Ziele, die Entwicklung intelligenter Frästechnologien für die Bearbeitung von mittels AM gefertigten Titan- und Aluminium-Großstrukturen, in weiten Teilen erfolgreich erreicht. Es wurden innovative Lösungen zur Optimierung der komplexen Zerspanprozesse erarbeitet, die ein erhebliches Potenzial aufweisen, die Effizienz, Präzision und Wirtschaftlichkeit in der additiv-subtraktiven Fertigung speziell für die anspruchsvollen Anforderungen der Luftfahrtindustrie signifikant zu steigern. Diese Fortschritte adressieren die Herausforderungen, die sich aus den spezifischen Materialeigenschaften und der endkonturnahen Fertigungsmethode ergeben, und ebnen den Weg für eine kostengünstigere und ressourcenschonendere Produktion von Leichtbaustrukturen.

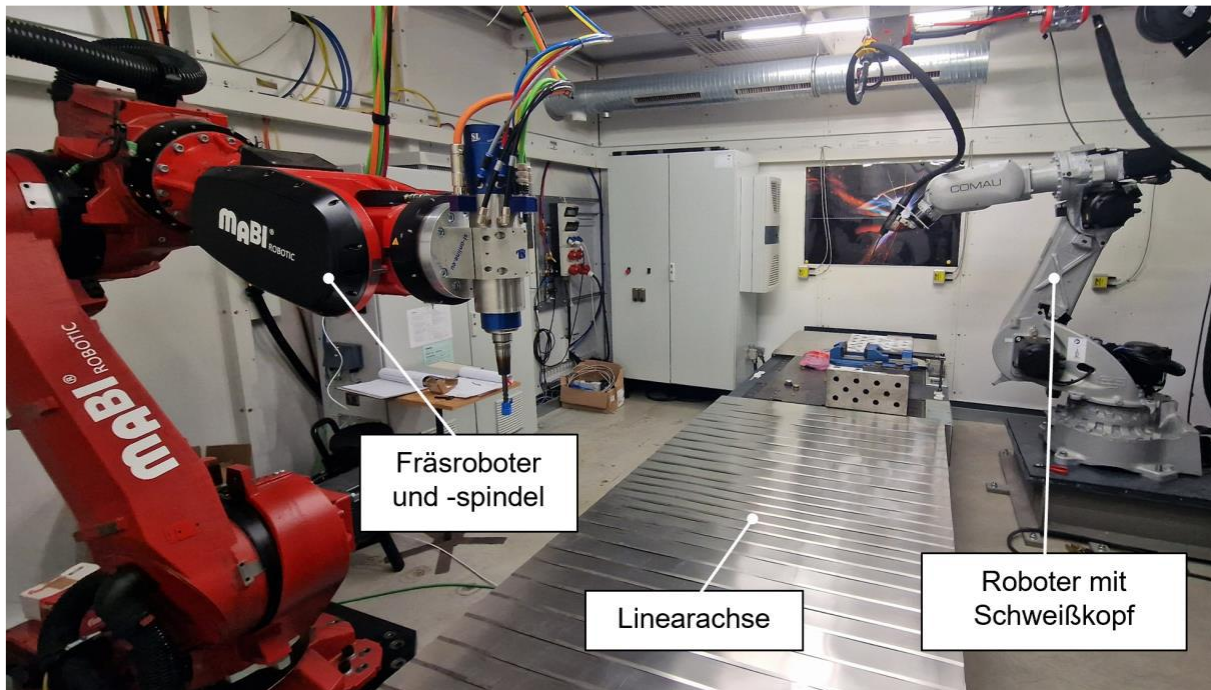


Abbildung 14: Aufbau der Fertigungszelle am Fraunhofer IAPT

Somit ist das Projektergebnis des Einzelvorhabens der Ergänzung der Hardwareentwicklungen mit geeigneten Software-Lösungen (z. B. zur CAM-Planung) für die Erzielung der Aufbauratensteigerung um min. 50 % gegenüber der Fertigung ohne Laser, der Reduktion der resultierenden Rauheit um 20 % und der Produktivitätssteigerung der Zerspanungsprozesse um ca. 35 %. Dazu wurden die Grundlagenuntersuchungen und Hardware-Entwicklungen (z. B. Prozesstechnik, Sensorik, Steuerung) durchgeführt, während parallel die Entwicklung einer digitalen Prozesskette zur Prozessvorbereitung (z. B. CAM-Planung, Parameteroptimierung durch ML-Ansätze), Überwachung (z. B. Sensortechnik zur Qualitätserfassung) und Auswertung (z. B. Darstellung der Sensor- und Steuerungswerte als Digital Twin) fokussiert.

Die erfolgreiche Implementierung und experimentelle Validierung der Online-Verformungskompensation ermöglichte eine Reduktion des Maßfehlers um ca. 70%, was den Bedarf an kostenintensiver Nachbearbeitung reduziert. Die detaillierten Untersuchungen zur robotergestützten Aluminiumbearbeitung lieferten Erkenntnisse zur Optimierung von Prozessparametern und der spezifischen Werkzeugauswahl unter Berücksichtigung der dynamischen Stabilität des Bearbeitungssystems, wodurch ebenfalls Produktivitätssteigerungen erreicht wurden.

Die Arbeiten im Bereich der digitalen Prozesskette, speziell die Entwicklung der Modelle zur Simulation des additiven Materialauftrags sowie der Prozesskraftsimulation, sowie Simulation der elastischen Rückfederung nachgiebiger Strukturen und die Integration der Online-Verformungskompensation in Siemens NX, legen den Grundstein für eine verbesserte digitale Fertigungsplanung. Die gewonnenen detaillierten Erkenntnisse zu den spezifischen Qualifizierungsanforderungen für additiv gefertigte Luftfahrtstrukturbauteile tragen maßgeblich dazu bei, die notwendigen industrieweiten Standards für die erfolgreiche und sichere Integration additiv-subtraktiver Fertigungsprozesse in die hochregulierte Luftfahrtindustrie zu definieren und zu etablieren. Obwohl die Validierung der entwickelten Prozesse an realen Großstruktur-Funktionsmustern aufgrund unvorhergesehener Umstände nicht vollständig innerhalb der Projektlaufzeit abgeschlossen werden konnte, unterstreichen die bereits erzielten Ergebnisse das hohe disruptive Innovationspotenzial der Technologien und deren Relevanz für die zukünftige Luftfahrtproduktion.



Abbildung 15: Abschlusstreffen am Fraunhofer IAPT im April 2025

2.2 wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die größten Ausgabenpositionen im Rahmen dieses Projekts umfassten primär Personal und Verbrauchsgüter sowie zu einem kleineren Teil auch Sachkosten für die Versuche und die Pilotlinie. Detaillierte Aufschlüsselungen hierzu sind im separaten Verwendungsnachweis enthalten, der von der Verwaltung der Siemens AG erstellt wurde.

2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Förderung ermöglicht der Siemens AG die Schaffung zusätzlicher Stellen für Doktoranden und die Mitwirkung von Experten sowie Studierenden und deckt den projektspezifischen Sachaufwand.

Die Bearbeitung des beschriebenen Teilprojekts mit alleiniger Finanzierung ist aus wirtschaftlichen Gründen wegen des erheblichen Aufwands und technischen Risikos ausgeschlossen.

Auch können die zeitlichen und finanziellen Aufwände der Siemens AG nicht ohne eine öffentliche Förderung aufgebracht werden, da Personal und Haushaltsmittel hierfür nicht zur Verfügung stehen.

Ohne die Unterstützung durch die Förderung wäre die Durchführung dieses Vorhabens nicht möglich gewesen.

2.4 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses

Als umfassender Anbieter von Digitalisierungslösungen für additive und subtraktive Fertigungsprozesse erzielte Siemens eine Erweiterung des Produktportfolios für die metallverarbeitende Industrie durch Integration von Technologiebausteinen für die additive Fertigung. Das Portfolio beinhaltet generell verschiedene Software-, Steuerungs- und Anlagen-Lösungen für das Management von einzelnen Maschinen und ganzen Fertigungslinien. Neben der Fertigungsplanung können die Bewegungsplanung sowie Simulation von Fertigungsprozessen mittels der durchgängigen digitalen Kette durchgeführt werden.

Die erarbeiteten Technologiebausteine zum Laser-Lichtbogen-Hybridprozess kombinieren in einer Prozesskette Siemens NX, Industrial Edge, CMVM und SINUMERIK. Darüber wurde der Einsatz von direkt mit der SINUMERIK angesteuerten Robotern verwendet. Die Prozesstechnik ist nur durch eine digitale Kette vom Engineering über die Simulation bis hin zum nahtlosen Transfer auf die Steuerung möglich. Spezielle Ansätze auf Steuerung und als Software-Modul erlauben weitere iterative Anpassungen der Bahn bzw. der Kräfte auf der Bahn des Roboters für eine Steigerung der Genauigkeit.

Den Zielen des Projektes entsprechend bieten die Ergebnisse des Vorhabens für die Siemens AG einerseits die direkte Verwertung in ihren Produkten SINUMERIK, NX, CMVM und Industrial Edge. Andererseits kann durch die Multiplikation der Projektergebnisse an die Kundenberater und den Vertrieb

das Dienstleistungssegment der Siemens AG im Hinblick auf neue additive und subtraktive Fertigungsmethoden erweitert werden. Zudem wurde im Projekt eng mit den Projektpartnern Racontec und Fooke kooperiert, die bereits Siemens-Lösungen aus der Steuerungstechnik einsetzten, was zudem die Verwertung der Projektergebnisse für Siemens vereinfacht.

2.5 Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts bei anderen Stellen

Der aktuelle Stand von Technik und Wissenschaft wurde zu Beginn des Vorhabens umfassend recherchiert und dokumentiert sowie während der gesamten Projektlaufzeit kontinuierlich aktualisiert. Nach unserem Kenntnisstand sind während der Durchführung des Vorhabens keine konkurrierenden Fortschritte anderer Stellen im relevanten Forschungsgebiet bekannt geworden.

2.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses

Das AMAvia-Projekt und Forschungsergebnisse daraus wurden auf dem Laser Anwender Form (LAF) in Bremen am 23. November 2022 vorgestellt, eine erweiterte Präsentation von Forschungsinhalten, sowie ein Austausch mit Experten fand auf der Fachmesse 'Schweißen' in Wels, Österreich am 25. April 2024 statt. Die Präsentationen wurden unter dem folgenden Titel durch die Veranstalter veröffentlicht: „Digitale Prozesskette für die Fertigung komplexer Strukturen mittels hybrid WAAM“.

Des Weiteren befinden sich zum aktuellen Zeitpunkt zwei Paper in den Veröffentlichungsprozessen, die sich jeweils mit der Optimierung von Prozessparametern im WAAM-Verfahren zur genauen Geometrie-Vorhersage, sowie mit der Optimierung der Roboterbewegungen, besonders bei additiven Prozessen, auseinandersetzen und neue Optimierungsverfahren präsentieren. Sie tragen die Arbeitstitel "Development Of An AI-Algorithm For Predictive Parameteroptimization In Robot-based Additive Manufacturing" bzw. "A Reactive Tolerance-Aware Motion Controller".

3 Anhang

3.1 Hinweise zu Patenten, Schutzrechten etc.

Im Rahmen des AMAvia Projektes wurde eine Erfindungsmeldung vorgenommen, die zu einer Patentanmeldung geführt hat:

EP 4 345 560 A1: Verfahren und Vorrichtung zum Bestimmen eines additiven Herstellprozesses eines Bauteils sowie additiver Herstellprozess des Bauteils