

Schlussbericht zum KI4KMU-Projekt

KI4ToolPath

Geometrieunterstützte Klassifizierung von Prozesszuständen zur Bahnplanungsunterstützung – am Beispiel des WAAM-Prozesses

Projektzeitraum:

01.06.2022 bis 31.05.2024

Berichtszeitraum:

01.06.2022 bis 31.05.2024

Förderkennzeichen:

01IS22021C

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 01IS22021C gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der Autorin/beim Autor.



GEFÖRDERT VOM



1. Darstellung der durchgeführten Arbeiten

Die Arbeitsschwerpunkte des Fraunhofer IPT lagen im durchgeführten Projekt KI4ToolPath insbesondere in der Durchführung und Untersuchung des Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM), der Prozessdatenakquise, der Prozessdatenaufbereitung und der Validierung. Außerdem konnten durch die Prozessbeobachtung und Datenauswertung aussagekräftige Erkenntnisse über den WAAM-Prozess selbst gewonnen werden. Im Folgenden wird der Arbeitsanteil des Fraunhofer IPT an den einzelnen Arbeitspaketen dargestellt.

AP1 – Anforderungsdefinition an System, Software und Demonstrator

Im ersten Arbeitspaket des Projektes KI4TooPath wurden partnerübergreifend die Grundanforderungen an Projektkomponenten und Arbeitspaketinhalte definiert. Dabei wurden Abhängigkeiten identifiziert und der Datenaustausch zwischen den einzelnen Projektpartnern organisiert.

Im Fokus des Fraunhofer IPT lagen die prozessspezifischen Aspekte, sowie der Use-Case. In einem ersten Schritt wurde der Prozess Wire Arc Additive Manufacturing analysiert und relevante Prozessgrößen betrachtet (Abbildung 1).

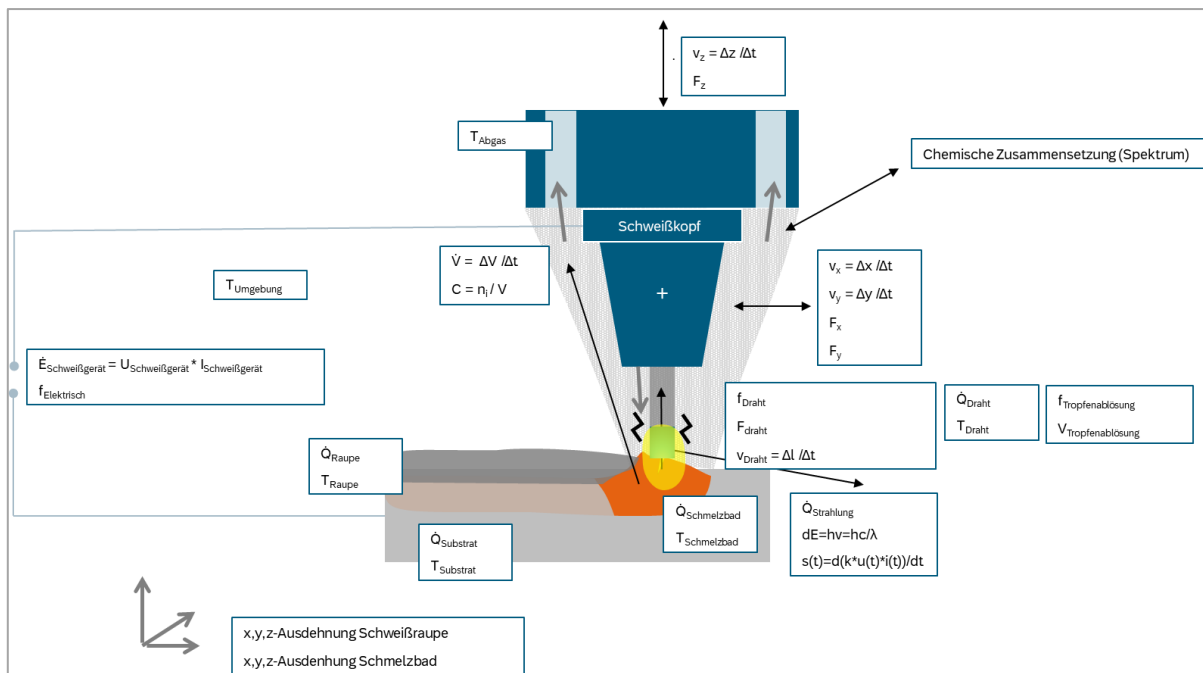


Abbildung 1: Messgrößen in der Bearbeitungszone.

Basierend auf diesen Betrachtungen wurden die räumliche Ausdehnung der Schweißraupe und die Wärmeemission des Prozesses als relevante Prozessgrößen identifiziert. Beide sind sowohl zeit- als auch ortsabhängige Prozessgrößen. Die räumliche Ausdehnung der Schweißraupe kann bereits während des Fertigungsprozesses als Indikator für die Qualität des späteren Produkts genutzt werden. Eine zu hohe lokale Erwärmung führt zum Zerfließen der Schmelze, ein zu niedriger Wärmeeintrag zu schwankendem Auftragsverhalten. Die Wärmeemission ist folglich ein Indikator für die Prozessstabilität.

Bei der Feststellung der räumlichen Ausdehnung sollte nicht nur die Geometrie des fertigen Bauteils erfasst werden, sondern auch die Möglichkeit bestehen, lagenweise Daten

aufzunehmen. Dadurch ist eine zeitliche Auflösung und Korrelation von Prozessabweichungen mit den Bauteiltemperaturen möglich. Als aussagekräftigste geometrische Ausdehnungsgrößen wurden zunächst die Höhe der Schweißbahn (z-Richtung) und die Breite der Schweißbahn (x-Richtung) festgelegt. Die Wärmeemissionen sind sowohl vor als auch nach der Bearbeitungszone relevant. Zusätzlich sollte die Temperatur des Gesamtbauteils erfasst werden können, um Informationen zur Wärmeausbreitung und Abkühlverhalten des Gesamtbauteils zu erhalten. Durch die Dateninfrastruktur müssen somit mindestens zwei Größen der räumlichen Ausdehnung, sowie drei Größen der Wärmeemission zeitlich aufgelöst übertragen werden. Die Notwendigkeit einer Ortsauflösung hängt von der Art und Montage der Sensoren ab, die in AP2 ausgewählt werden und der ausgewählten Temperaturindikatoren.

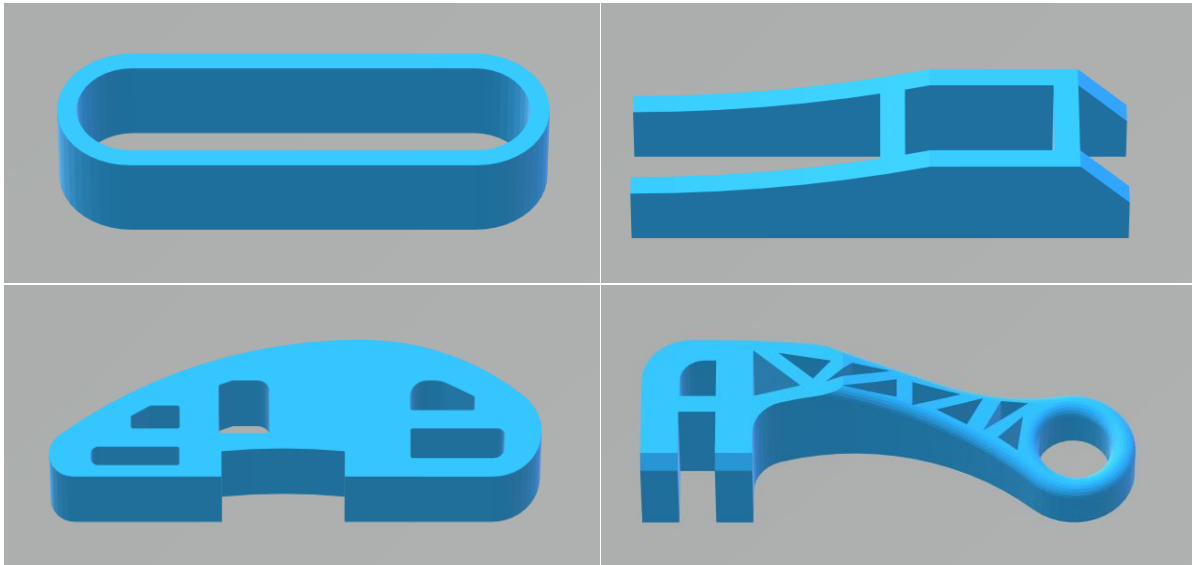


Abbildung 2: 3D-Darstellung der ersten Demonstratoren.

Um die Bahnplanung in ihrer Komplexität zu variieren, wurden zunächst in Abstimmung mit dem Projektkonsortium 4 unterschiedliche Demonstratoren vom Fraunhofer IPT definiert und konstruiert (Abbildung 2). Im Projektverlauf wurde die Menge an Demonstratoren erweitert, um eine ausreichend große und der Problemstellung entsprechende Datengrundlage für das Machine Learning zu erzeugen. Die Demonstratoren dienen hauptsächlich der Validierung der Forschungsarbeiten zu Projektende. Der erste Demonstrator war eine einfache geschlossene Bahn, die bei einem stabil verlaufenden Prozess kein Aussetzen des Schweißprozesses oder Bahnsprünge erfordert. Die folgenden Geometrien waren komplexer, da sie Kreuzungspunkte und auszufüllende Flächen enthalten. Die letzte Geometrie wies ein Netzwerk aus schmalen Stegen auf und ist somit insbesondere aus Sicht der Bahnplanung eine Herausforderung.

Da das KI-System auf einen möglichst großen Datenpool zugreifen muss, um effizient zu lernen, hat das Konsortium entschieden nicht nur eine Nutzung realer Prozessdaten, sondern auch simulativ erzeugte Daten zu nutzen. Dafür werden im Laufe des Projektes eine beliebige Anzahl an 3D-Dateien aus öffentlich zugänglichen Datenbanken, beispielsweise Thingiverse oder GrabCAD, hinzugezogen.

AP2 – Prozessdatenakquise und -verarbeitung

Im zweiten Arbeitspaket wurden vom Fraunhofer IPT auf Grundlage der Anforderungen aus AP1 Sensoren ausgewählt, beschafft und initial in Betrieb genommen.

Um die Temperatur des Bauteils an unterschiedlichen Punkten aufzunehmen, können berührende und berührungslose Sensoren genutzt werden. Für den Anwendungsfall eignen sich allerdings nur berührungslose Sensoren, da Temperaturen nahe der Bearbeitungszone beobachtet werden soll und das Bauteil generativ erzeugt wird. Durch die hohen Temperaturgradienten sind schnelle Abkühlvorgänge zu erwarten, weswegen eine Unterbrechung des Prozesses zur Aufnahme von Messwerten vermieden werden soll. Es wurden sowohl Pyrometer als auch Thermokameras in Betracht gezogen. Pyrometer messen die Temperatur punktuell und sind deswegen weniger flexibel einsetzbar als Thermokameras, welche Temperaturen räumlich hoch aufgelöst darstellen können. Da die Messung synchron an verschiedenen, variierenden Bauteilpunkten erfolgen soll und Prozessabweichungen relevante Prozessgrößen, beispielsweise die Fokuslage, beeinflussen, überwiegen im Projektrahmen die Vorteile der Thermokamera.

Um eine passende Thermokamera für die Anwendung im WAAM zu identifizieren, wurden zunächst die mögliche Auflösung und die Arbeitsdistanz verschiedener Systeme verglichen. Diese sollten sich in einem definierten, dem Anlagenaufbau angepassten Bereich bewegen. In Abbildung 3 ist ein Zielbereich grün dargestellt, in welchem sich die Distanz zwischen Kamera und Messobjekt (durch die Anlage und den Prozess beschränkt) und das Measurement Field of View (MFOV) im Aufbau des Fraunhofer IPT bewegen sollten.

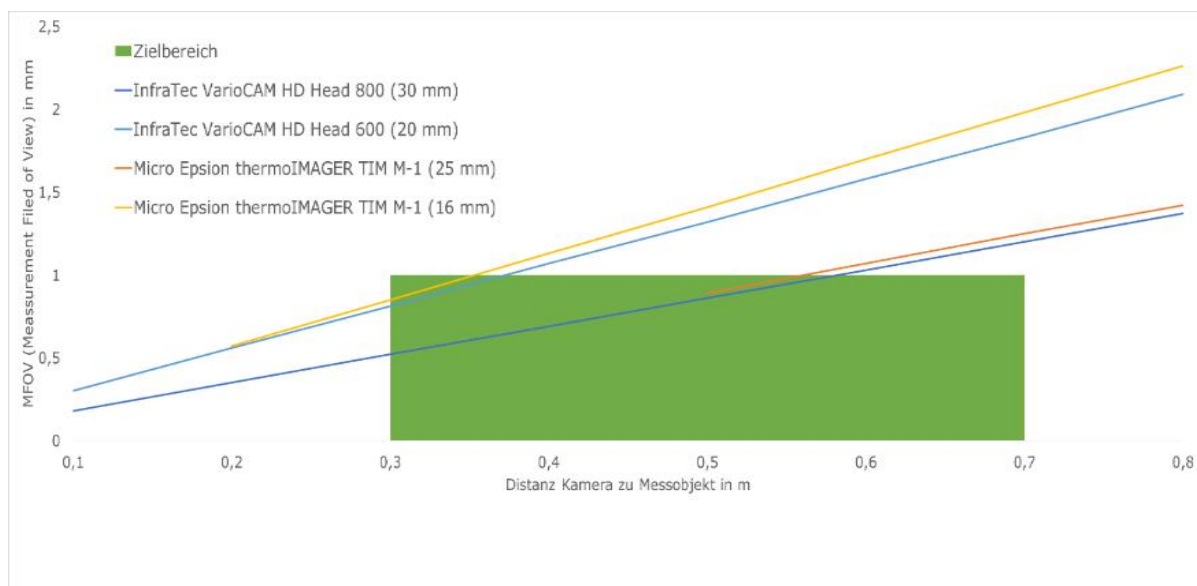


Abbildung 3: MFOV verschiedener Thermokameras.

Aufgrund des Vergleichs unterschiedlicher Systeme wurde das Thermografiesystem VarioCAM® HD head 800 für das Projekt beschafft. Ausschlaggebend war insbesondere auch die hohe Auflösung von 1024x768 Infrarot Pixeln, die zum Beschaffungszeitpunkt von keinem weiteren Anbieter für stationäre Thermografielösungen angeboten werden konnte, allerdings bei dem gegebenen Arbeitsabstand und der geforderten Genauigkeit notwendig ist. Durch eine Kalibrierung auf einen Temperaturbereich bis 2000°C ist die maximal messbare Temperatur außerdem höher als bei allen vergleichbaren Systemen. Das ist insbesondere für Messaufgaben nahe der Prozesszone relevant, in der bis zu 5000°C vorherrschen können.

Die Erfassung der Bauteilgeometrie sollte initial während des Prozesses geschehen, da Unterbrechungen der Bearbeitung zu ungewünschten Abweichungen von realen Fertigungsprozessen führen würden. Die räumliche Ausdehnung musste demnach ebenfalls berührungslos aufgenommen werden. An dieser Stelle wurden verschiedene Sensorarten im Detail verglichen. Eine zusammenfassende Übersicht des Vergleichs ist in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Vor- und Nachteile ausgewählter Geometriesensoren

Geometriesensor	Vorteile	Nachteile
Laser-Profil-Sensor	Geringe bis mittlere Kosten Hohe Auflösung Fehlerresistent Schichtweise Messung im Prozess möglich	Muss zur Erfassung bewegt werden
Stereo Vision	Schnelle Erfassung Bewegte und statische Messung möglich	Geringe Genauigkeit oder hohe Kosten Fehleranfällig
Time of Flight	Schnelle Erfassung Bewegte und statische Messung möglich	Geringe Genauigkeit oder hohe Kosten Fehleranfällig
Streifenprojektion	Hohe Auflösung Fehlerresistent	Hohe Kosten Erfassung nur ohne Bewegung möglich

Da der Laser-Profil-Sensor während des Fertigungsprozesses kontinuierlich Aufnahmen des momentanen Bearbeitungsstatus der Bauteile erstellen kann, wurde dieser Sensortyp für die Messaufgaben ausgewählt. Aufgrund der Möglichkeit auf glühenden metallischen Oberflächen mittels blauem Laser fehlerfrei zu messen, ist der scanCONTROL 3012-50/BL der Firma Micro-Epsilon beschafft worden.

Nach der Auswahl und Beschaffung wurden unterschiedliche Konzepte zur Nutzung bzw. Anordnung ausgearbeitet und erste Tests mit der Sensorik durchgeführt. Die Konzepte betrachten sowohl eine seitliche als auch eine Inline-Anordnung der Laser-Profil-Sensoren (siehe Abbildung 4).

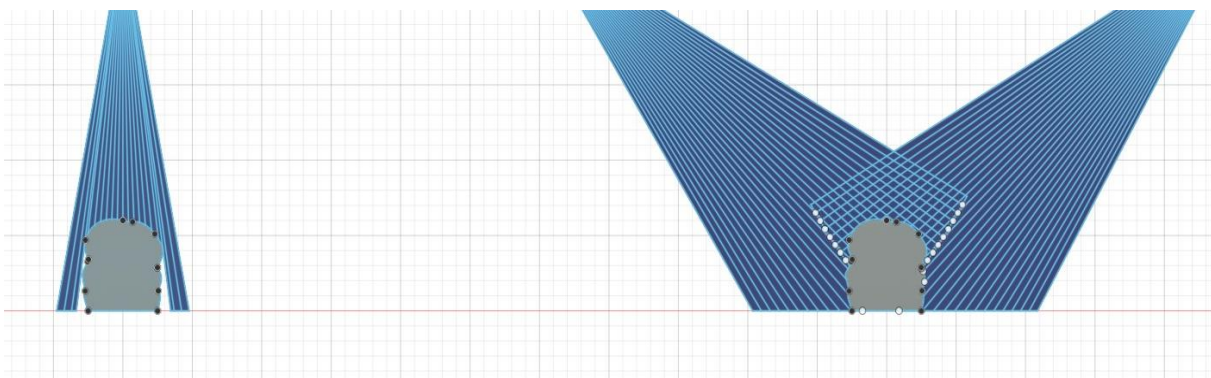


Abbildung 4: Mögliche Anordnung der Laser-Profil-Sensoren (links: Inline-Anordnung; rechts: seitliche Anordnung).

Da als Indikator für die Prozessstabilität insbesondere die Bauteilhöhe relevant ist, wurde sich für eine Inline-Anordnung der Sensoren entschieden. Diese kann eine direkte Aussage über die Bauteilhöhe liefern, ohne eine rechenintensive Verknüpfung der beiden gewonnen Sensordaten zu benötigen. Das Thermografiesystem wurde mit einer relativ zu dem Bauteil stationären Positionierung und einer

flexibel dem Bearbeitungskopf folgenden Positionierung getestet. Da durch eine relativ zu dem Bauteil stationäre Positionierung sowohl die Entwicklung der Temperaturverteilung des Gesamtbauteil als auch die durchgehend die Maximaltemperatur beobachtet werden kann, wurde diese ausgewählt. In Abbildung 5 ist die Anbringung der Thermokamera an einem Aluminiumprofil mit direkter Verbindung zur Aufspannung zu sehen.



Abbildung 5: Bearbeitungszone der WAAM-Anlage mit montiertem Thermografiesystem (roter Kreis).

Außerdem wurde die Schnittstelle zwischen Sensorik und KI erforscht. Dazu wurden mögliche Eingangsdatenformate und -strukturen für die KI betrachtet. Relevante Daten sind Geometriedaten in Form von STL oder STEP, Bilder der Thermokamera als PNG und Rohdaten als CSV. Für die KI-Anwendungen im Projektumfang wurde der Fokus auf die Geometriedaten und die Rohdaten gelegt, die ebenfalls die relevanten Temperaturdaten enthalten. In Absprache mit den Projektpartnern sollte die erste KI-Anwendung auf Geometriedaten und einer geometriebasierten Bahnplanungsstrategie aufbauen. Die Temperaturdaten und die Deformationsdaten sollten zu einem späteren Zeitpunkt integriert werden.

Zur Datenaufnahme, -aufbereitung und -auswertung wurden am IPT unterschiedliche Verfahren betrachtet und verglichen. Die grundsätzliche Datenaufnahme wurde zunächst erfolgreich mit den Standardprogrammen der Hersteller getestet. Da relevante Daten allerdings unmittelbar aufgenommen und in einem für eine KI verarbeitbaren Datenformat gespeichert werden sollen, wurde eine eigene Softwarelösung erforscht. Zunächst wurde die Möglichkeit einer Datenaufbereitung über eine IPT-intern entwickelte Software geprüft. Die Software nutzt eine Python Bibliothek zur Integration, Vorverarbeitung, FE und Zielgrößenverknüpfung zur Trainingsdatengenerierung aus großen, parallelen Zeitreihen. Die direkte Nutzung von Software-Development-Kits (SDKs) der Hersteller, die Funktionen für den Zugriff auf die Hardware bereitstellen, und die direkte Weiterverarbeitung in einer Anwendung wurde allerdings als effizienter bewertet. Durch die Nutzung der SDKs kann über CType Schnittstellen auf vom Hersteller zur Verfügung gestellte Win-DLL Dateien zugegriffen werden, wodurch eine Interaktion mit der Wärmebildkamera möglich ist. Die Software wurde aufgrund einer guten Kompatibilität der SDKs in Python aufgesetzt. Da die Geschwindigkeit der im Programm implementierten Callback-Funktion zunächst nicht hoch genug für den Abruf der einzelnen Thermokamera-Aufnahmen war, wurde auf Threadpooling zurückgegriffen. Das

Threadpooling benutzt Threads aus einem Pool die den gleichen Speicherplatz nutzen, somit können diese einfach Daten teilen und durch geteilte Variablen kommunizieren.

Zur Datenspeicherung wurden sowohl die Voxelisierung, also die orts aufgelöste Diskretisierung von Parametern, als auch die zeitliche Synchronisierung von Messwerten betrachtet. Der Vorteil der Voxelisierung liegt in der Funktionalität bei der Verarbeitung von 3D-Daten. Er ist insbesondere in der 3D-Objekterkennung und bei Simulationen sinnvoll. Beim Voxelansatz liegt der Fokus auf dem Endprodukt, wobei das Remelting zu Geometrieänderungen während des Fertigungsprozesses und somit zu Ungenauigkeiten in der Zuordnung führen kann. Bei der zeitlichen Synchronisierung ist eine Zuordnung über den Zeitstempel und den GCode möglich. Da die tatsächliche Geometrie Teil des Informationsgehalts einer Wertemenge sein und die von der KI benötigten Informationen auf eine begrenzte Menge an Werten reduziert werden kann, fiel die Entscheidung auf die zeitliche Synchronisierung von Messwerten.

Tabelle 2: Beispiel eines CSV-Datensatzes, welcher mittels der am Fraunhofer IPT entwickelten Software zur Aufnahme von Sensordaten erzeugt worden ist.

Sensor1_Zeit	Sensor1_T	Sensor1_Date	Sensor1_Shape	Sensor1_Array_List
24	264,44974	17_19_24_646	(400, 400)	[161.20718 161.52725 161.60727 ... 161.2872 161.36722 161.68729]
24,004	264,36978	17_19_24_650	(400, 400)	[161.44724 161.52725 161.2872 ... 161.32721 161.32721 161.52725]
24,009	264,1699	17_19_24_655	(400, 400)	[161.00714 161.44724 161.44724 ... 161.40723 161.32721 161.40723]
24,015	263,65018	17_19_24_661	(400, 400)	[161.16718 161.44724 161.48724 ... 161.04715 161.16718 161.40723]
24,031	263,4503	17_19_24_677	(400, 400)	[161.2472 161.16718 160.96713 ... 161.84732 161.52725 161.48724]
24,049	263,29037	17_19_24_695	(400, 400)	[161.00714 161.2472 161.16718 ... 161.52725 161.84732 161.64728]
24,079	264,64963	17_19_24_725	(400, 400)	[160.76709 161.12717 161.52725 ... 161.60727 161.2472 161.20718]
24,109	262,81064	17_19_24_755	(400, 400)	[161.2472 161.60727 161.68729 ... 161.40723 161.2472 161.48724]
24,155	262,5308	17_19_24_801	(400, 400)	[161.08716 161.52725 161.64728 ... 161.44724 161.36722 161.48724]
24,184	262,85062	17_19_24_830	(400, 400)	[161.12717 161.12717 161.48724 ... 161.12717 161.48724 161.2472]
24,215	262,3309	17_19_24_861	(400, 400)	[161.48724 161.2472 161.64728 ... 161.36722 161.08716 161.08716]

Als Zieldatenformat wurde ein leicht lesbares CSV oder HDF5- Format definiert (Tabelle 2). In der Programmiersprache Python wurde ein Programm aufgesetzt, das die entstehenden relevanten Daten mithilfe der SDKs der Hersteller aufnimmt und diese zunächst in einem Pickle-Format zwischenspeichert. Das Pickle-Dateiformat nutzt Serialisierung, bei der die internen Datenstrukturen eines Python-Objektes durchlaufen und die relevanten Informationen in eine binäre Repräsentation umgewandelt werden. Dadurch ist eine schnelle Aufnahme großer Datenmengen möglich. Die Umwandlung in ein leicht lesbares CSV- oder HDF5-Format, welche als Input-Layer für die KI dienen, findet im Anschluss statt. Eine direkte Umwandlung ohne Zwischenschritt über Pickle in CSV wurde geprüft, ist allerdings durch die langsame Verarbeitung des CSV-Formats nicht möglich. Insbesondere das Thermografiesystem erzeugt große Datenmengen in kurzer Zeit. Um zusätzlich die benötigte Verarbeitungsgeschwindigkeit zu erreichen, wurde auf Threadpooling zurückgegriffen, welches eine effiziente Nutzung des Arbeitsspeichers sicherstellt. Zur Aufnahme und Verarbeitung der Daten wurde sich nach Prüfung der Schnittstellen für ein Edge-Device mit lokaler PC-Anbindung und gegen eine Cloudlösung entschieden.

AP3 – Prozessmodellierung WAAM

In diesem Arbeitspaket wurden zunächst Prozessuntersuchungen zur Trainings- und Prozessdatengenerierung durchgeführt. Dazu wurden unterschiedliche Geometrieelemente in variierenden Größen aufgebaut. Die Prozessparameter basierten auf Standardparametersets, das bedeutet eine konstante Schichthöhen, definierte Schweißkennlinien und konstante Prozessgeschwindigkeiten. Während der Fertigungsprozesse wurden diverse Prozessdaten aufgenommen und diese im Anschluss ausgewertet. Die Komplexität der Geometrieelemente wurde während der Versuche sukzessive gesteigert und so eine Vielzahl von Daten generiert.

Abbildung 6 zeigt das Ergebnis eines Aufbaus einer einfachen Struktur mit sich steigender Anzahl aufeinanderliegender Lagen. Im Verlauf der Maximaltemperaturen der Bauteile ist eine kontinuierliche Zunahme mit der Lagenhöhe bis hin zu einem asymptotisch konstanten Durchschnittswert von über 1000 °C zu sehen. Die Temperaturkurven deuten beim Aufbau identischer Geometrien auf eine reproduzierbare Temperaturverteilung im Bauteil hin.

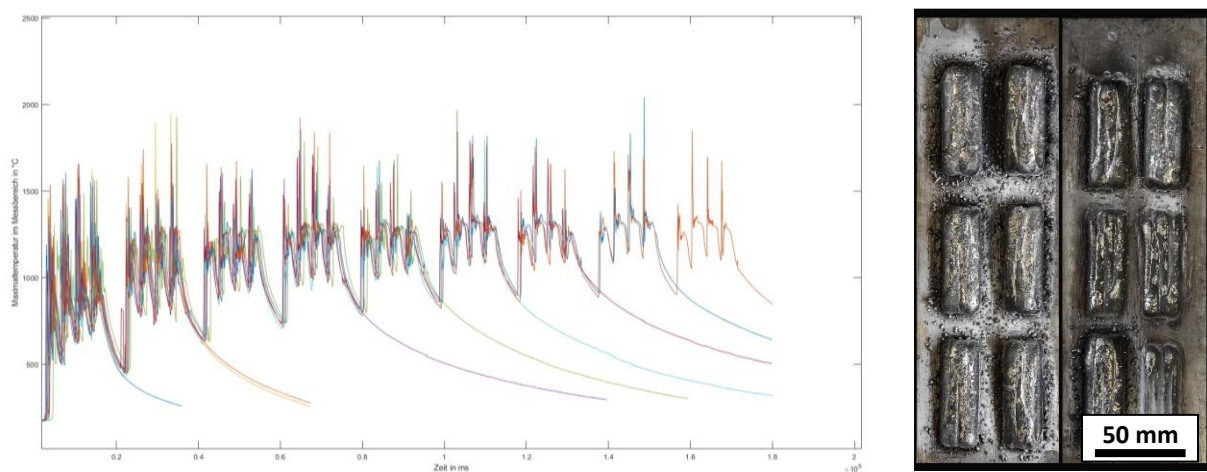


Abbildung 6: Verlauf der Bauteil-Maximaltemperatur im lagenweisen Aufbau mit unterschiedlichen Anzahlen an Lagen (links: Verlauf der Maximaltemperatur der Bauteile; rechts: Fertigungsergebnisse der Bauteile).

Außerdem wurden die Prozessgrenzen getestet, indem ein Abweichen der Lagenhöhe durch zu geringe Abkühlzeiten zwischen dem Überschweißen einer noch heißen Lage induziert wurde. Abbildung 7 zeigt eine beispielhafte Aufnahme des Laser-Profil-Sensors, bei dem sich das Bauteil durch eine zu hohe Wärmezufuhr im markierten Bereich verformt hat.



Abbildung 7: Aufnahme des Laser-Profil-Sensors zweier Schweißbahnlagen. Im markierten Bereich hat eine Verformung durch zu hohe Wärmezufuhr stattgefunden.

In einer Studie zum Einfluss von Prozessunterbrechungen auf die mittlere Bauteiltemperatur wurden 180 mm lange mehrlagige Stege mit dem Edelstahl 316 L (Si) mit unterschiedlichen Pausenzeiten zwischen den einzelnen Lagen aufgebaut. Bei einer Aufbauhöhe von 30 Lagen wurden Höhenabweichungen von bis zu 15 mm zwischen 20 s pausierten und nicht pausierten Prozessen mit identischen Schweißparametern gemessen. Die Höhenabweichungen werden mit zunehmender Bauteiltemperatur größer. Abbildung 8 zeigt ein Bild der Temperaturmessung während des lagenweisen Aufbaus eines Steges. Es ist zu sehen, dass die Temperatur des Lagenuntergrundes vor dem Materialauftrag über 900 °C beträgt.

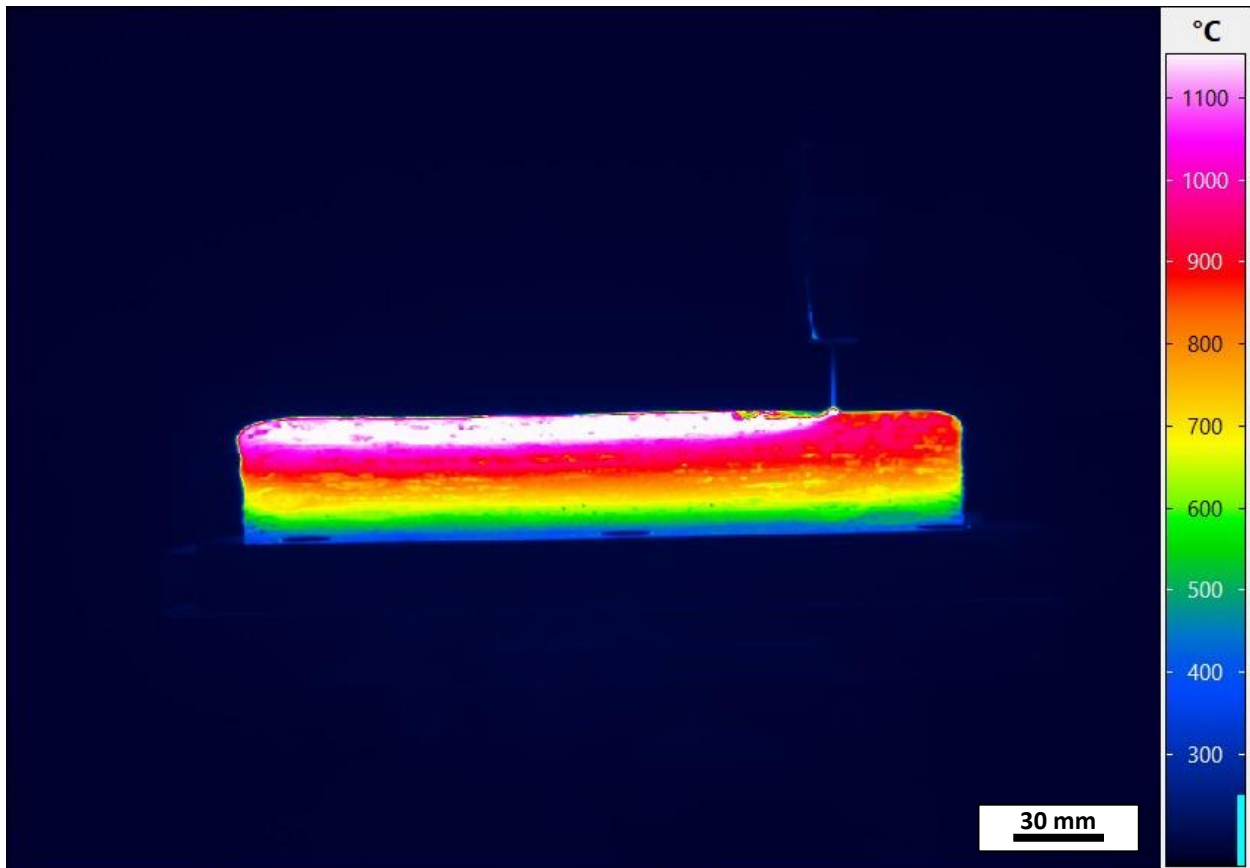


Abbildung 8: Temperaturmessung während dem lagenweisen Aufbau eines mehrlagigen Steges aus 316 L (Si).

Da die Bauteiltemperatur an der Stelle des Materialauftrags entscheidend für die Formabweichungen der Schweißraupen ist, wurde eine Auswertung der Temperaturverläufe der unterschiedlich pausierten Prozesse durchgeführt. Die mittlere Bauteiltemperatur nicht pausierter Stege stieg um mehr als das 100 % im Vergleich zu zwischen den Lagen 20 s pausierten Stegen an (Abbildung 9). Damit wird deutlich, dass die Lagenuntergrundtemperatur ein entscheidender Faktor für die Maßhaltigkeit ist und eine entsprechende Bahnplanung durch eine KI diese als Input-Faktor nutzen kann.

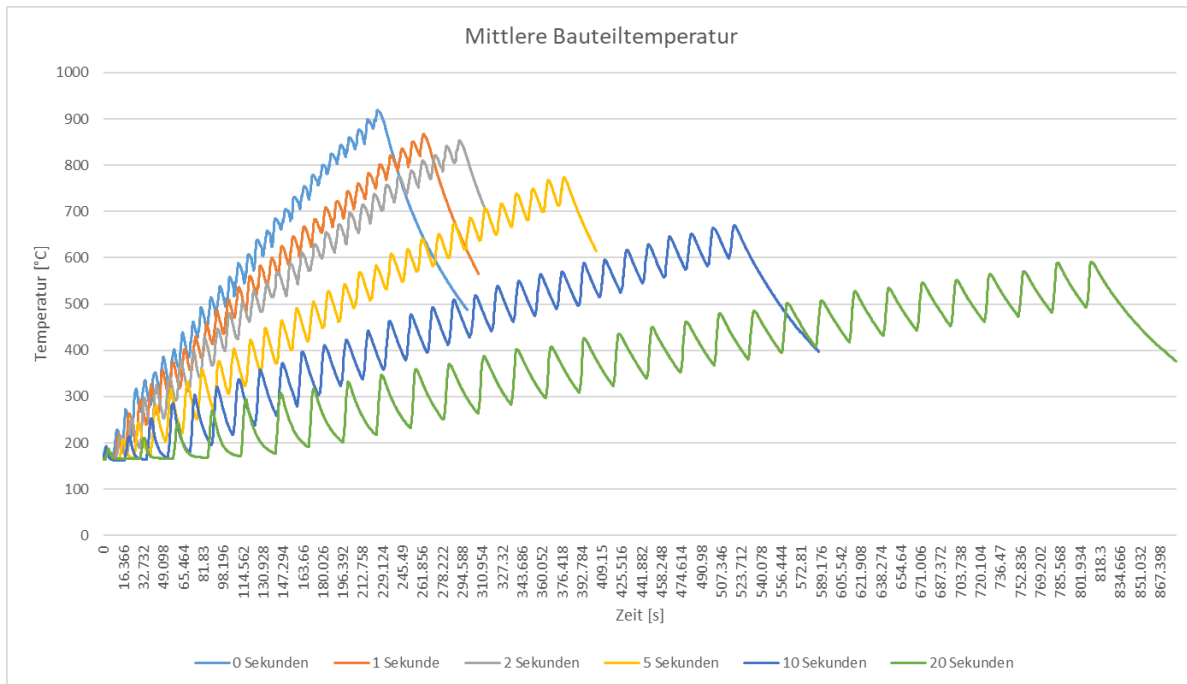


Abbildung 9: Verlauf der mittleren Bauteiltemperatur beim lagenweisen Aufbau eines 30-lagigen Steges aus 316 L (Si).

Für einfache Bauteile wurden weiterhin Prozess- und Regelstrategien zur Prozessstabilisierung erforscht. Dafür wurden zunächst die Einflussfaktoren auf die Temperaturverteilung im Bauteil betrachtet. Als wichtigster Reglerparameter wurde die Bahnplanungsstrategie identifiziert, da diese ohne Wechselwirkungen mit anderen Prozessparametern beeinflusst werden kann. Identische Bauteile wurden mit unterschiedlichen Bahnplanungsstrategien aufgebaut und der Prozessverlauf durch die Sensorik aufgenommen. In Abbildung 10 ist beispielsweise eine einfache Geometrie mit konzentrischer und exzentrischer Bahnführung aufgeschweißt worden. Der Prozessverlauf zeigte starke Wärmekonzentration im Zentrum der konzentrischen Bahnführung, was auch durch das Zerfließen des Werkstoffs in der Werkstückmitte sichtbar wird.

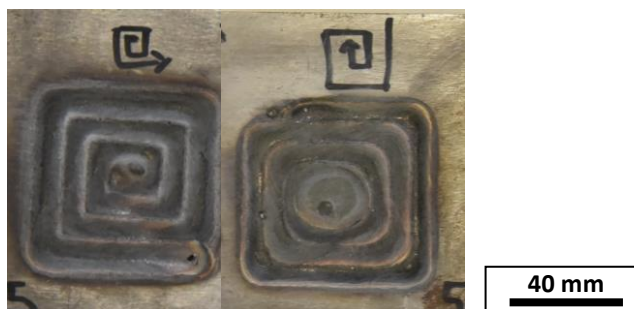


Abbildung 10: Ergebnis eines Aufbaus eines einfachen einlagigen Bauteils mit unterschiedlicher Bahnführung (links: exzentrisch; rechts: konzentrisch).

Mittels der Versuche in diesem Arbeitspaket wurden Möglichkeiten zur Prozessbewertung identifiziert und Gesetzmäßigkeiten zur Korrelation der Bauteilgeometrie mit den maximalen Bauteilgeometrien aufgestellt. Außerdem wurde eine Datenbasis für Trainings- und Testdaten aufgebaut.

AP4 – Erforschung einer KI für die KI-gestützte Bahnplanung

In Arbeitspaket 4 wurde von Seiten des Fraunhofer IPT Prozesswissen in die Erforschung der KI eingebracht. Um einen effektiven und zielgerichteten Lernprozess zu gestalten, wurden die Prozessgrenzen identifiziert und diese für die Kostenfunktion bereitgestellt. Daten, die zur Verfügung gestellt wurden, beinhalten Bahnabstände, Lagenhöhen und Prozessparameter. Außerdem wurden optimale und zu vermeidende Bahnplanungsszenarien aufgenommen.

Als Ergänzung wurde, wie bereits in der Beschreibung zu Arbeitspaket 2 beschrieben, die farbbehafte Voxelisierungsmethode detailliert betrachtet. Eine Anwendung im Projektrahmen ist nicht zu erwarten, allerdings ist eine Nutzung für vergleichbare Anwendungen möglich. Auf konzeptioneller Ebene wurden eine Übertragung der Prozessparameter in die Farbinformationen der Voxel untersucht und mögliche Anwendungen identifiziert. Die Methode ist insbesondere für Prozesse geeignet, die stabile Prozessverläufe mit konstanten Bedingungen nach der Parameterzuweisung haben.

AP5 – Erforschung einer KI gestützten Bahnplanung

In Arbeitspaket 5 wurde die Erforschung der Bahnplanung prozessseitig unterstützt. Hierzu sind in Absprache mit Moduleworks die Voraussetzungen für eine Umsetzung in der Bahnplanungssoftware definiert worden. In enger Absprache wurden relevante Parameter identifiziert, welche durch den Nutzer einstellbar sein sollen. Außerdem wurden gemeinsam die Maschinenspezifikation und der von der Anlage benötigte Maschinencode für die Ausgabedatei analysiert. Dadurch wird sichergestellt, dass das Ergebnis der Bahnplanung unmittelbar durch die Maschine verarbeitet werden kann.

Die Firma Moduleworks stellte dem Fraunhofer IPT Softwaremodule zur vereinfachten WAAM Prozessplanung zur Verfügung. Der darin genutzte Workflow entspricht dem des im Projekt angestrebten Entwicklungsprodukt und konnte somit bereits durch das IPT getestet werden.

AP6 – Validierung

Zunächst wurden Demonstratoren identifiziert und die anlagenseitigen Voraussetzungen für die Durchführung von Versuchen geschaffen. Da die KI-Bahnplanung bis zum Projektende kein repräsentatives Fertigungsprogramm erstellen konnte, wurden zunächst die Theorien zum Einfluss der Bahnplanung auf die Wärmeverteilung in Bauteilen überprüft. Dazu wurden flächige Bauteile aus 316 L (Si) mit unterschiedliche Bahnplanung und identischen Schweißparametern auf ein Substrat aufgebracht, beispielsweise in einer viereckigen Form (Abbildung 11). In der Validierung bestätigte sich, dass bei einer hohen Temperatur des Bauteiluntergrundes insbesondere bei eng geführten Bahnen ein längerer Verbleib in der Schmelze zu Geometrieabweichungen führt. Damit muss eine Bahnplanung durch eine KI so ausgelegt werden, dass Bauteile möglichst gleichmäßig erhitzt werden.



Abbildung 11: Flächige WAAM-Bauteile, die mit unterschiedlichen Bahnstrategien aufgetragen worden sind.

Außerdem wurden erste Demonstratoren (Abbildung 12) hergestellt, um die Fertigung von komplexeren, durch eine KI geplante Bauteile vorzubereiten.



Abbildung 12: Großes dünnwandiges WAAM-Bauteil.

Der WAAM Prozess wurde zudem aus wirtschaftlicher Sicht auf Basis eines Life-Cycle-Costing-Ansatzes (LCC) analysiert. Dabei wurde die Systemgrenze um den reinen Fertigungsprozess mittels WAAM gelegt und etwaige Nachbearbeitungsschritte nicht betrachtet. Es wurde zunächst eine Methode aufgestellt, die eine vergleichende Bewertung der Kosten zulässt. Diese basiert auf einer Vorgehensweise, welche mit der des Life-Cycle-Assessments (LCA) für die Bewertung von Umweltfaktoren vergleichbar ist. Zunächst wird eine Ziel- und Umfangsdefinition vorgenommen. Anschließend wird eine Bilanz von Gütern und Ressourcen um den Fertigungsprozess gebildet, die Kosten aufgenommen und das Ergebnis des Vergleichs interpretiert. Eine erste Analyse der Fertigung von Bauteilen mit WAAM am Fraunhofer IPT zeigte, dass die Materialkosten bei 316 L (Si) etwa 80 % der Fertigungskosten ausmachen. Bei einer effizienteren konturnäheren Bahnplanung mittels KI könnte Material eingespart werden, was die Fertigungskosten signifikant senken würde. Insbesondere bei teureren Materialien hätte dies einen großen Effekt für die Bauteilkosten. Sobald Bauteile mittels KI-Bahnplanung hergestellt worden sind, kann die aufgestellte Methode für eine vergleichende Studie genutzt werden.

2. Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Im Projektverlauf sind neben den Kosten für Personal weitere Kosten angefallen. Es wurden zum einen Sensoren für die Aufnahme von Messdaten beschafft, deren Auswahl entsprechend der Darstellung des Inhalts im Schlussbericht erfolgte. Für die Durchführung der Schweißversuche wurde zudem Material beschafft. Da die Projekttreffen bei den Partnern vor Ort stattgefunden haben und die Projektergebnisse auf der Mittelstandskonferenz dargestellt worden sind, sind während der Projektlaufzeit Reisekosten angefallen.

3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Die Arbeiten, die im Rahmen des Projektes durchgeführt worden sind, hatten das übergeordnete Ziel die KI-Entwicklung zu unterstützen und eine Versuchsumgebung für die KI-Entwicklung und Validierung bereitzustellen. Dafür wurde die notwendige Infrastruktur bestehend aus Hardware und Software aufgebaut und getestet. Es wurden Versuchsdaten aufgenommen und Versuche zu Einflussgrößen im WAAM durchgeführt. Außerdem wurden die Arbeiten an der KI und der Bahnplanung durch Prozesswissen unterstützt. Zur Validierung wurden alle notwendigen Schritte getestet und Methoden aufgestellt. Die Projektarbeiten wurden somit entsprechend der Planung durchgeführt.

4. Sind inzwischen von dritter Seite relevante FE-Ergebnisse auf dem Gebiet des Vorhabens bekannt geworden?

Nein, von dritter Seite ist weiterhin kein vergleichbarer Ansatz bekannt.

6. Fortgeschriebener Verwertungsplan:

a) Erfindungen, Schutzrechtsanmeldungen und erteilte Schutzrechte, die vom Zuwendungsempfänger oder von am Vorhaben Beteiligten gemacht oder in Anspruch genommen wurden sowie deren standortbezogene Verwertung (Lizenzen u.a.) und erkennbare Verwertungsmöglichkeiten.

Es haben sich keine Änderungen gegenüber der Antragstellung ergeben.

b) Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende (mit Zeithorizont) – z.B. auch funktionale/wirtschaftliche Vorteile gegenüber Konkurrenzlösungen, Nutzen für verschiedene Anwendergruppen/-industrien am Standort Deutschland, Umsetzungs- und Transferstrategien (Angabe sowie die Art des Vorhabens dies zulässt).

Die im Projekt angestrebte Softwarelösung für WAAM-Anlagen wird zahlreiche Vorteile für die Nutzer bieten. Sie reduziert die aufwendigen Vorbereitungs- und Anpassungsschritte der Maschinenparameter und ermöglicht eine eindeutige Planbarkeit des WAAM-Prozesses. Durch Berücksichtigung der Temperaturgradienten werden Prozessinstabilitäten minimiert. Im Vergleich zu sensorgestützten Lösungen, die erst während des Prozesses eingreifen, berücksichtigt die Software diese Instabilitäten bereits in der Prozessplanung. Die Software richtet sich insbesondere an Endanwender, die große Metallhalbzeuge produzieren oder große Bauteile reparieren.

Im Rahmen des Projektes konnte keine ausreichend trainierte KI-Lösung entwickelt werden, um sie unmittelbar in einem Softwareprodukt zu verwerten. Allerdings wird der Vorteil der angestrebten Lösung gegenüber Alternativen, wie zuvor beschrieben, sehr hoch eingeschätzt. Die Entwicklungen bezüglich der KI-Software werden konzeptionell sofort nach Projektende weiterverfolgt, sodass perspektivisch eine Übertragung in die Industrie durch Fortführung der Entwicklungen erwartet wird. Die Projektpartner planen einen gemeinsamen angepassten Projektansatz, der eine andere KI-

Architektur aufweist. Als Zeithorizont für eine erfolgreiche Weiterentwicklung wird ein Zeitraum von drei Jahren abgeschätzt.

Eine Übertragbarkeit auf vergleichbare Materialien und Maschinen kann im Anschluss umgesetzt werden.

c) Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende (mit Zeithorizont) - u.a. wie die geplanten Ergebnisse in anderer Weise (z.B. für öffentliche Aufgaben, Datenbanken, Netzwerke, Transferstellen etc.) genutzt werden können. Dabei ist auch eine etwaige Zusammenarbeit mit anderen Einrichtungen, Firmen, Netzwerken, Forschungsstellen u.ä. einzubeziehen.

Von der wissenschaftlichen Perspektive wird unmittelbar an die Ergebnisse angeknüpft. Das KI-System wird weiter erforscht und die Projektpartner planen entsprechende Projekte. Sobald eine zuverlässige KI-Bahnplanung entwickelt worden ist, ist beispielsweise die Übertragbarkeit auf alternative Verfahrensvarianten, Maschinensysteme und Materialien möglich. Dafür ist dann ein weiteres Training der angepassten KI-Systeme notwendig. Das WAAM-Verfahren ist für diese KI-Anwendung besonders geeignet, da das Verfahren derzeit noch mit starken Prozessschwankungen behaftet ist. Der Erkenntnisgewinn in diesem komplexen Prozess ist für das Fraunhofer IPT ein wichtiger Projekterfolg. Die wissenschaftliche Herangehensweise der Projektpartner eröffnet zusätzlich durch die Außendarstellung nach Erzielen weiterer relevanter Ergebnisse auch für andere fertigende Industrien mit Bahnplanungs-Problemstellungen einen neuen Blickwinkel auf das Möglichkeitsspektrum mit KI.

Neben der weiteren geplanten Zusammenarbeit mit ModuleWorks und collective mind nutzt das Fraunhofer IPT die gewonnenen Erkenntnisse im Themenbereich WAAM und Digitalisierung des Fertigungsprozesses für die Durchführung darauf aufbauender Projekte und die Weiterbildung von Studierenden im Rahmen von Lehrveranstaltungen.

d) Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit für eine mögliche notwendige nächste Phase bzw. die nächsten innovatorischen Schritte zur erfolgreichen Umsetzung der Ergebnisse.

Die Projektergebnisse bieten der Projektpartnern eine Möglichkeit zur weiteren Arbeit an einer KI-Bahnplanung mit einem alternativen Ansatz. Einzelne Projektergebnisse, für das Fraunhofer IPT insbesondere im Bereich der WAAM-Prozessforschung, sind eigenständig nutzbar. Eine konsequente Weiterentwicklung oder Erweiterung des Forschungsfeldes könnte einen größeren Nutzerkreis in zukünftigen Projekten erreichen. Es gibt verschiedene Anwendungsbereiche, wie z.B. die Verarbeitung von Materialien mit unterschiedlicher Wärmeleitfähigkeit und Bearbeitungstemperaturen. Es gibt auch ähnliche Verfahren in der additiven Fertigung von Metallen, die mit starken Prozessschwankungen zu kämpfen haben. Eine KI-gestützte Bahnplanung könnte auch hier Verbesserungen ermöglichen und zur Serienproduktion führen. Darüber hinaus wäre die Übertragung der Software von einem 2,5-Achs-System auf ein mehrachsiges System, wie z.B. einen Roboter, für Anlagenhersteller im WAAM-Bereich perspektivisch interessant. Dadurch könnten zusätzliche Benutzer in die Zielgruppe für die Vermarktung einbezogen werden.

Im Anschluss an das Projekt ist ein Vergleich mit einem Ansatz mit einem Vision-Transformer von Interesse. Dieser ermöglicht die Einbeziehung zusätzlicher (Teil-)Datenmengen neben den Geometriedaten.