Projektträger für das

DLR Projektträger

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

INDUSTRIELLE GEMEINSCHAFTSFORSCHUNG

Schlussbericht vom 31.12.2025

zum IGF-Vorhaben 01IF22714N

Thema

Entwicklung eines Dexel-basierten Geometriesimulationsmodells zur Analyse der Prozessstabilität und Herstellbarkeit von großvolumigen DED-Strukturen - DexPro

Berichtszeitraum

01.01.2023 bis 30.06.2025

Forschungsvereinigung

Forschungsvereinigung Programmiersprachen für Fertigungseinrichtungen e.V.
Theaterstrasse 12
52062 Aachen

Forschungseinrichtung(en)

Forschungsvereinigung Programmiersprachen für Fertigungseinrichtungen e.V.
Theaterstrasse 12
52062 Aachen

Fraunhofer-Gesellschaft e.V.
Fraunhofer-Einrichtung für Additive Produktionstechnologien IAPT
Am Schleusengraben 14
21029 Hamburg

INDUSTRIELLE GEMEINSCHAFTSFORSCHUNG

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung 4

1.1 Forschungsthema 4

1.2 Forschungsziel 5

1.3 Wissenschaftliche Relevanz 5

1.4 Wirtschaftliche Bedeutung der angestrebten Forschungsergebnisse für KMU 7

1.5 Wissenschaftlich-technischer Ansatz 9

1.6 Lösungsweg 9

1.7 Arbeitspakete 10

2 Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse 16

2.1 Arbeitspaket 1: Anforderungsdefinition 16

2.2 Arbeitspaket 2: Bereitstellung der Bahngenerierungstoolboxen 19

2.3 Arbeitspaket 3: Entwicklung von Teilmodellen, erforderlich für die Geometriemodellierung 22

2.4 Arbeitspaket 4: Entwicklung eines Dexel-basierten Geometriesimulationsmodell für Materialauftrag und Materialabtrag 30

2.5 Arbeitspaket 5: Entwicklung des Geometriemodells und Ableitung von zeit- und ortsabhängigen Dimensionen des virtuellen Werkzeugs (3D-Schmelzbad) 31

2.6 Arbeitspaket 6: Erweiterung des Dexel-basierten Geometriesimulationsmodell mit Ablage und Abrufen von charakteristischen Kerngrößen 36

2.7 Arbeitspaket 7: Prozessabbruchkriterien für das Geometrie Modell und Ermittlung der optimalen Prozessstrategie 37

2.8 Arbeitspaket 8: Validierung des Geometriemodells 39

3 Verwendung der Zuwendung 42

4 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit 43

5 Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU sowie ihres innovativen Beitrags und ihrer industriellen Anwendungsmöglichkeiten 44

5.1 Wissenschaftlich-technischer Nutzen 44

5.2 Wirtschaftlicher Nutzen insbesondere für KMU 45

5.3 Innovativer Beitrag und industrielle Anwendungsmöglichkeiten 45

6 Wissenstransfer in die Wirtschaft 46

7 Durchgeführte Transfermaßnahmen 47

7.1 Durchgeführte Transfermaßnahmen (vom Projektstart bis zum Projektende) 47

7.2 Geplante Transfermaßnahmen (nach Projektende) 48

8 Literaturverzeichnis 50

9 Anhang 52

9.1 Experimentale Datensätze 52

1 Einleitung

1.1 Forschungsthema

Directed Energy Deposition (DED), eine Verfahrensklasse der additiven Fertigung, sind für die charakteristische **hohe Auftragsrate** und das **größere Auftragsvolumen** im Vergleich zu pulverbettbasierten (PBF) Verfahren bekannt. DED ist eine additive Fertigungstechnologie, die auf dem klassischen Schweißverfahren basiert, mit dem 3D-Metallbauteile aus CAD-Daten durch schichtweises Auftragen erzeugt werden [1]. Der Bearbeitungskopf bewegt sich auf einem vorher festgelegten Vektorpfad von einer Schicht zur Nächsten und setzt den Bauprozess auf der vorherigen Schicht fort, wodurch ein 3D-Bauteil entsteht. Die Verwendung eines Industrieroboters oder eines Portalsystems für die Anbringung des Auftragskopfes ermöglicht die Herstellung von Strukturen, die mehrere Meter lang sein können. Im Bauwesen wurden bereits Brückenteil von bis zu 12 m Länge mit dieser Technologie hergestellt [2]. In der Luft- und Raumfahrt wurden Strukturbauteile aus Ti-Legierungen mit Auftragsraten von mehr als 2.500 cu.cm. pro Stunde gedruckt [3]. Im Vergleich dazu kann mit der PBF-Technologie nur eine maximale Bauhöhe von 850 mm erreicht werden, die durch die Prozesskammer begrenzt ist. Typisch ist eine Aufbaurate von 10 - 40 cu.cm pro Stunde [4].

In der Regel werden DED-Prozesse für die Herstellung von endkonturnahen Bauteilen für den Zerspanungsprozess verwendet [5, 6] , wodurch das **Buy-to-Fly-Verhältnis**[1] bei bestimmten Bauteilen von 20:1 auf 4:1 reduziert werden kann, was wiederum zur **Ressourceneffizienz** beiträgt. Obwohl DED-Prozesse eine ressourcenschonende Herstellungsweise für Luft- und Raumfahrtmaterialien aus Ti- und Ni-Legierungen darstellen, **ist eine weit verbreitete Industrialisierung im Vergleich zu Pulverbettverfahren noch nicht zu erkennen**. Dies liegt vor allem an den technischen Herausforderungen, die mit dem Prozess selbst und auch mit der CAD/CAM-Prozessplanung und Simulation verbunden sind. Durch hohe Auftragsraten wird auch mehr Material und Wärme in das Substrat eingebracht, weshalb auch Eigenspannungen und Verformungen größer sind. Bindefehler zwischen zwei Schweißlinien mit hoher Auftragsrate sind groß genug, um eine Rissbildung unter Spannung auszulösen. Um wärmeinduzierte und werkzeugbahninduzierte Defekte zu vermeiden, ist eine **optimierte Prozessstrategie** erforderlich, welche einen optimierten Prozessparametersatz in Kombination mit einer intelligenten und geometrieabhängigen Werkzeugbahnsequenzierung umfasst. Dies wird vorwiegend durch einen iterativen Prozess erreicht [7]. **First Time Right ist im heutigen Szenario nicht möglich,** stellt jedoch eine wichtige Zielstellung dar, um diese Technologie wirtschaftlich tragfähig zu gestalten.

Diverse Forschungsprojekte und industriegeführte Projekte haben sich mit der Industrialisierung von DED-Verfahren befasst und zur Entwicklung verschiedener Methodologien geführt, welche in Kapitel 3.1.3 ausführlich beschrieben sind. **FEA-basierte Simulationsmodelle**, die auf einem numerischen Ansatz basieren, sind die vorherrschende Methodik zur Vermeidung iterativer Prozessoptimierung. Diese Lösungen sind jedoch in der Regel sehr **rechenintensiv** und erfordern **umfangreiches Know-how** und **Fachwissen**, wodurch dieser Ansatz auf Forschungsinstitute und große Unternehmen beschränkt ist. Andererseits sind CAD/CAM-Softwarepakete, die mit DED-Modulen ausgestattet sind, für die kinematische Simulation geeignet, aber **es fehlt die Prozesssimulation und Prozessvorhersage**. Für eine breitere Industrialisierung der DED-Verfahren ist es jedoch notwendig, einfache Werkzeuge (Software Tool) für die Auslegung der Prozessstrategie zu

[1] Das Buy-to-Fly-Verhältnis gibt die Relation zwischen dem Gewicht des eingekauften Rohmaterials und dem Gewicht des Endteils wieder.

entwickeln. Davon sollen insbesondere kleinere Unternehmen profitieren und **die Einstiegshürde in diese Ressourcen- und kosten- sparende Technologien werden reduziert**.

Das angestrebte Projekt zielt daher darauf ab, eine alternative Methodik im bekannten CAD/CAM-Bereich anstelle des hochkomplexen FEA-Bereichs zu entwickeln. Erreicht wird dies durch die Entwicklung eines **Dexel-basierten Geometriesimulationsmodells** zur Prozessoptimierung, mit anschließender Prozessstabilitätsanalyse im virtuellen Umfeld. Ein Dexel-Modell verwendet ein Gitter aus Linien- oder Würfelsegmenten in einer bestimmten Richtung, um ein Volumen darzustellen. Diese Dexel-Modelle werden häufig in der Zerspanungssimulation verwendet, um das abzutragende Volumen simulieren zu können [3, 8]. Eine grafische Darstellung der unterschiedlichen Modellierungsansätze einschließlich des Dexel-Ansatzes ist in Abbildung 1 zu sehen.

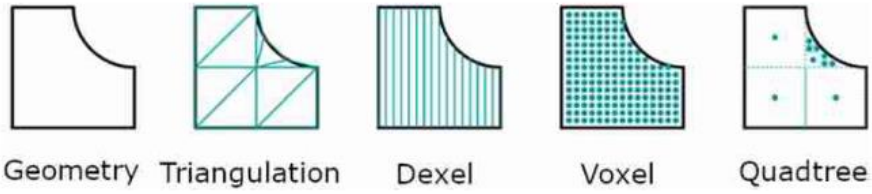


Abbildung 1: Unterschiedliche Modellierungsansätze nach [9]

1.2 Forschungsziel

1. Ersetzen der zeit- und rechenintensiven FEA-Simulation durch schnellere Dexel-basierte Geometriesimulation in einer gewohnten CAD/CAM Umgebung für DED Prozess Optimierung
2. Entwicklung von vereinfachten Algorithmen und semi-empirischen Modellen für die Geometriemodellierung
3. Vorhersage der Prozessstabilität und Herstellbarkeit von großvolumigen DED-Strukturen, um Prozessabbrüche und -defekte zu vermeiden

1.3 Wissenschaftliche Relevanz

Die resultierenden Eigenschaften des additiv gefertigten Bauteils sind abhängig von den Eigenschaften der einzelnen Schichten, die im Wesentlichen von verschiedenen Prozessparametern und der Prozessdynamik selbst bestimmt werden. Die Abhängigkeit der Bauteilqualität und der Prozessstabilität von der **Schmelzbadtemperatur** und der **Dynamik** des Schmelzbades wurde bereits untersucht [10 bis 13]. Bei konstanten Parametern wird während des Auftragens der ersten Lagen ein Großteil der Wärmezufuhr von der Grundplatte abgeleitet, was zu einer gleichmäßigen Schweißnahtmorphologie führt. Mit dem Fortschreiten des Aufbauprozesses vergrößert sich jedoch der Abstand zwischen der Grundplatte und der letzten Aufbaulage, welche zu einer geringeren Wärmeleitung in die Grundplatte führt. Dieses Phänomen erhöht die Temperatur des Substrats, d.h. der vorgebauten Schichten, und führt zu einer **ungleichmäßigen Schmelzbadmorphologie**, Schichthöhe (Schmelzbadtiefe) und Schichtbreite (Schmelzbadbreite).

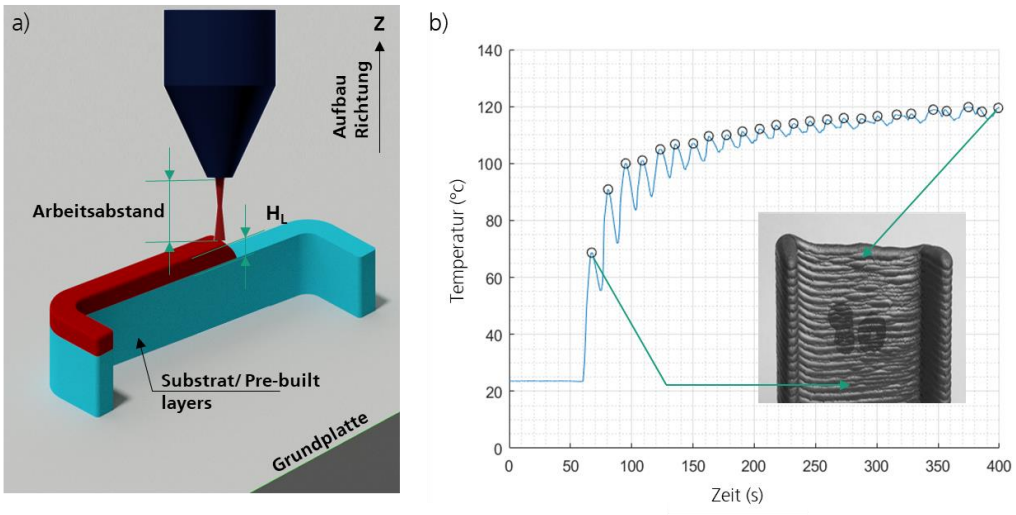


Abbildung 2: a) Schematische Darstellung eines DED-Prozesses; b) Temperaturverlauf, gemessen an der Grundplatte während des schichtweisen Auftragens

Dieser schichtweise Auftragsprozess ist in Abbildung 2.a schematisch dargestellt, und die sich daraus ergebenden Temperaturverläufe sind in Abb. 2.b zu sehen. Dieses Phänomen verursacht zusätzlich eine veränderte Mikrostruktur, die in Abb. 3 zu sehen ist [14]. Bei den meisten DED-Prozessen ist ein **fester Abstand** (Arbeitsabstand) zwischen dem Werkzeug und der zuletzt aufgebauten Schicht für die Prozessstabilität unerlässlich. Ohne einen Echtzeit-Regelkreis wird der Roboter jedoch mit einer vorgegebenen idealen Schichthöhe programmiert. Die Variation der aufgetragenen Schichthöhe in Aufbaurichtung führt aufgrund der sich ändernden thermischen Randbedingungen direkt zur **Prozessinstabilität** bis hin zum **Abbruch des Bauvorgangs**.

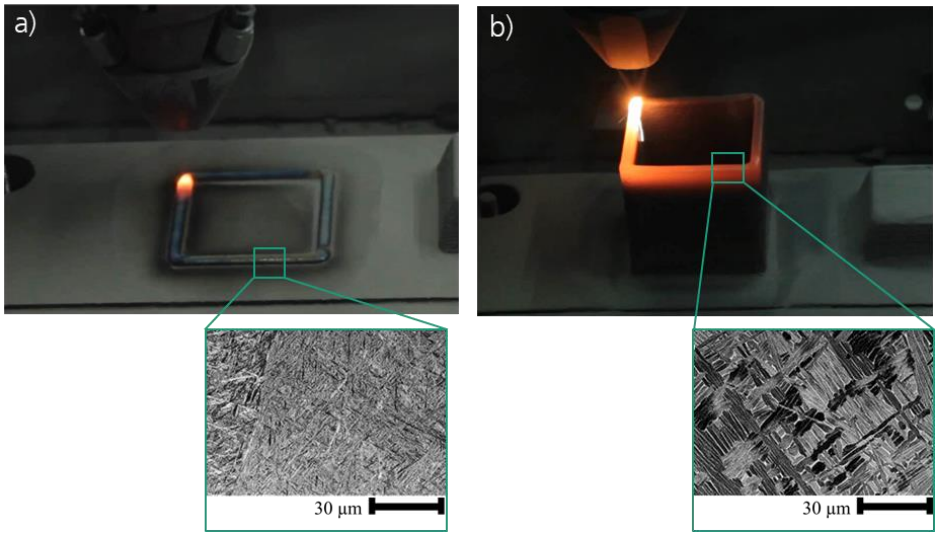


Abbildung 3: Von der Aufbauhöhe abhängige Gefüge; a) Martensitbildung in den ersten Schichten aufgrund der hohen Abkühlungsgeschwindigkeit, b) lamellares α + ß-Mikrogefüge in höheren Schichten aufgrund der geringeren Abkühlungsgeschwindigkeit

Die ungleichmäßige Wärmeverteilung während des Auftragsprozess führt zu positions- und schichtabhängigen Abkühlungsraten, die wiederum das entstehende Gefüge bestimmen. Die **fehlende Homogenität** der entwickelten Mikrostruktur in der Aufbaurichtung des aufgetragenen Materials führt zu einer Anisotropie der mechanischen Eigenschaften, [15, 16]. Für ein defektfreies Bauteil mit vordefinierten mechanischen

Eigenschaften ist das entscheidende Ziel die Ableitung einer optimierten Prozessstrategie, welche in Abbildung 4 dargestellt ist.

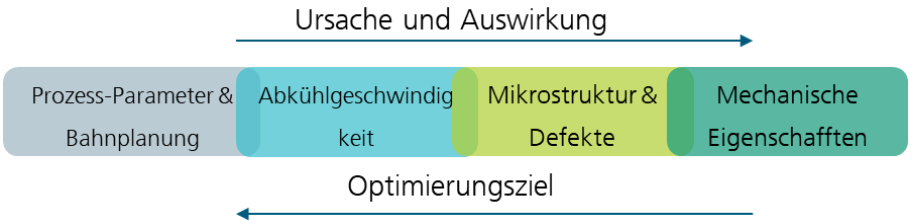


Abbildung 4: Das Ursache-Auswirkungs-Diagramm für einen typischen DED-Prozess

Zu den oben erwähnten Prozessinstabilitäten und der fehlenden Homogenität des Gefüges kommt hinzu, dass DED-Prozesse mit hoher Auftragsrate anfällig für **Bindefehler** sind, die zwischen den Schweißnähten einer einzelnen Schicht und zwischen zwei Schichten auftreten. Geometrien wie Kreuzungen, Ecken sowie Verbindungen zwischen Kern und Randbereich sind kritisch für den Auftragsprozess und erfordern bauteilspezifische Algorithmen zur Optimierung der Werkzeugbahn, um einen fehlerfreien Aufbau zu gewährleisten [17 bis 19]. Eine iterative Trial-and-Error-Methode ist eine der gängigen Methoden, um einen optimalen Werkzeugbahn zu erreichen, wenn die Losgröße minimal oder nur eins ist.

Zusammengefasst sind die folgenden technologischen Herausforderungen und das fehlende Expertenwissen die größten Hürden für KMUs bei der Einführung dieser Technologie.

1. Strukturelle Integrität und Homogenität der DED Komponenten nicht zuverlässig erreichbar
2. ‚First Time Right' nicht möglich – Defektfreie Bauteilherstellung nur durch iterative Versuchsreihen möglich
3. Ermittlung der idealen bauteilspezifischen Bahnplanung basiert nur auf langjähriges Expertenwissen

1.4 Wirtschaftliche Bedeutung der angestrebten Forschungsergebnisse für KMU

Der gesamte AM-Markt wurde im Jahr 2021 auf 7,18 Mrd. Euro bewertet, und es wird erwartet, dass dieser relativ neue Technologiebereich bis 2025 mit einem prognostizierten durchschnittlichen jährlichen Wachstum von 20 % wachsen wird. Allein der Metallmarkt wird auf 2,03 Mrd. Euro geschätzt, mit einem erwarteten Wachstume von etwa 30 % [20, 21]. Die Pulverbett Technologie führt den Metall-AM-Markt in allen Bereichen an, einschließlich der erzielten Einnahmen, der Anzahl der Unternehmen, der installierten Anlagenbasis usw. Danach folgt die DED-Technologie, die im Mittelpunkt dieses Projekts steht. In den letzten Jahren hat sich der Schwerpunkt in der Forschung und Entwicklung der Industrie auf skalierbare AM-Technologien und die Fähigkeit zur Herstellung großvolumiger Bauteile verlagert. DED-Technologien, die diese beiden Anforderungen erfüllen, sind daher in den Mittelpunkt der Aufmerksamkeit getreten.

Im Luft- und Raumfahrtsektor haben sich Laser-, Elektronenstrahl- und Lichtbogen-basierte DED-Technologien für Reparatur und Serienfertigung bereits durchgesetzt. Laser- und Lichtbogen (WAAM) basierte Verfahren haben in anderen Sektoren wie dem Schienenverkehr, der Automobilindustrie, Maschinenbauindustrie und bei Prototypen-Anwendungen an Popularität gewonnen. Bei erfolgreichem Abschluss dieses Projekts würden mehrere an der Prozesskette beteiligte Akteure von den Forschungsergebnissen profitieren. Die Umwandlung dieses Geometriesimulationsmodels in ein eigenständiges Endprodukt oder als Modul für

bestehende Softwarepakete wäre eine Aufgabe für CAD/CAM-Dienstleister. Mit diesem Tool soll letztlich die produzierenden KMUs profitieren. Im Folgenden werden drei wichtige wirtschaftliche Vorteile des geplanten Projekts im Detail dargestellt:

a) Eliminierung der Kosten für Fehlversuche

Das angestrebte Projekt "DexPro" entwickelt einen alternativen Ansatz für die iterative Methode zur Erzielung optimierter Werkzeugbahnen und erspart dadurch eine große Menge an Versuchszeit und die damit verbundenen Kosten. Dazu gehören Maschinenausfallkosten, Energiekosten, Materialkosten (Rohmaterial und Substrat) und Entwicklungskosten. Laut Aussage unserer PBA-Mitglieder ‚*Je nach Komplexität des Teils und vorheriger Erfahrung können mehrere Iterationen erforderlich sein, die bis zu mehr als einer Woche dauern können. Wenn man die Nachbearbeitungsschritte und die Materialcharakterisierung berücksichtigt, können sich die Gesamtkosten auf bis zu 25.000 € summieren. Dies gilt sowohl für Prototypen als auch für die Serienproduktion*‘. AM ist ein Synonym für die Losgröße 1, wobei die Nachfrage nach Prototypen und Ersatzteilen in letzter Zeit gestiegen ist. Diese höheren Kosten, die mit dem Trial & Error-Ansatz verbunden sind, erweisen sich bei einer Losgröße von einem Stück als nicht wirtschaftlich. Daher würde das geplante Software-Tool den Endanwendern einen Wettbewerbsvorteil bei dieser neuen Technologie verschaffen und die Vorlaufzeit verkürzen.

b) Ermöglichung einer Alternative zu kostenintensiven FEA-Softwarepaketen

Größere Unternehmen, die sich auf die Serienproduktion mehrerer Bauteile mit höheren Qualitätsanforderungen und Zertifizierungen konzentrieren, können sich die Erstinvestition in FEA-Softwarepakete leisten, gefolgt von jährlichen Lizenzgebühren, Aktualisierungen und Schulungen. Solche Großunternehmen verfügen möglicherweise bereits über ein solches Team, das sein Portfolio auf AM ausweitet. Für kleine und mittlere Unternehmen ist die Notwendigkeit zusätzlicher Investitionen in Softwarelizenzen von mehr als 50.000 € und Schulungen jedoch eine zusätzliche Belastung bei der Einführung neuer Technologien. Im Gegenteil, verschiedene CAD/CAM-basierte Softwarepakete werden in KMUs häufig verwendet. Insbesondere werden häufig anwendungsspezifische Softwarepakete und Module verwendet, die von CAD/CAM-Dienstleistern entwickelt und bereitgestellt werden. Einige dieser Anbieter wie Module Works, AixPath, EXAPT und CAMAIX sind Teil der PBA dieses Projekts, die von dem geplanten Geometriesimulationsmodell profitieren würden, das eine neue Produktergänzung ihres AM-Portfolios darstellen könnte.

c) Verringerung der Abhängigkeit von Anlagenherstellern

Aufgrund des Mangels an Standards und Normen im AM-Sektor, insbesondere in der DED-Technologie, wird das meiste Expertenwissen von den Anlagenherstellern und den Forschungsinstituten zusammengetragen. Die Abhängigkeit der Endanwender von den Anlagenherstellern hat eine zusätzliche Ausgabe für KMUs in Form von Anlagen- und werkstoffspezifischen Prozessparametern und manchmal auch von Softwarepaketen für die Werkzeugbahnplanung die beschafft werden müssen. Die Entwicklung von anlagen- und technologieunabhängigen Softwarelösungen mit integriertem Prozess-Know-how wäre daher ein notwendiges Hilfsmittel für eine breite Industrialisierung der DED-Technologien für KMUs.

Durch das Erreichen der definierten Ziele im Rahmen des DexPro-Forschungsvorhabens bieten sich besonders für KMUs folgende Vorteile:

- Verringerte Einstiegshürden in die additive Fertigung metallischer Bauteile

- Steigerung der Wirtschaftlichkeit durch erhöhte Prozessstabilität und reduzierte Anzahl an Prozessabbrüchen
- Wettbewerbsvorteile durch höhere Maßhaltigkeit und durch First-Time-Right-Produktion
- Übertragung des Bedarfs an Erfahrung und Prozess-Know-how auf ein intelligentes Bahnplanungswerkzeug

1.5 Wissenschaftlich-technischer Ansatz

Wie oben beschrieben, kann die Prozessplanung und -optimierung von DED-Prozessen mit einem numerischen Modellierungsansatz in einer FEA-Software gelöst werden. Diese ganzheitliche Methode wird zur Vorhersage von Eigenspannungen, Verformungen und mechanischen Eigenschaften verwendet. Die kinematische Modellierung und Simulation mit CAD/CAM-Softwarepaketen wird für die Roboterprogrammierung und Kollisionsanalyse zusammen mit der Visualisierung des Auftragsprozesses verwendet. Beide Ansätze gehen jedoch von einer vordefinierten Schweißnahtbreite und -höhe aus, was nicht der Realität entspricht. Daher können diese Ansätze nicht für die Analyse der Prozessstabilität oder der Herstellbarkeit verwendet werden, die realistische positionsabhängige Größen der Schweißnahtgeometrie erfordern.

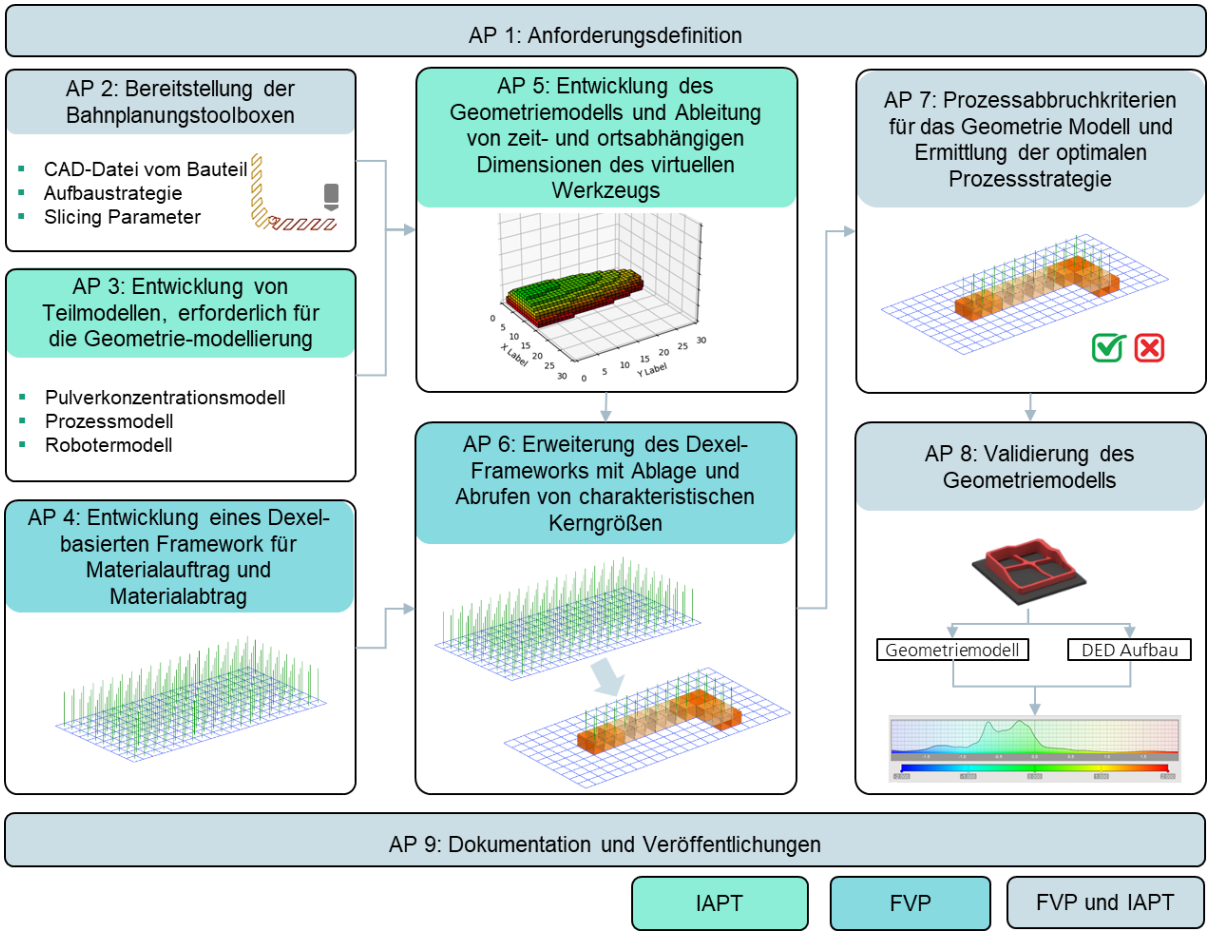
Die Geometriemodellierung mit Hilfe eines semi-empirischen Ansatzes bietet dagegen eine alternative Methode zur schichtweisen Vorhersage von Schweißnahtabmessungen, die weniger rechenintensiv ist. Allerdings fehlt bei diesem Ansatz die Temperaturabhängigkeit des Schweißprozesses, die für die Vorhersage von Eigenspannungen und Verformungen erforderlich ist. Die produzierenden KMUs sind jedoch in erste Linie an der Herstellbarkeit und Prozessstabilität interessiert. Außerdem gibt es kein kommerzielles Softwarepaket, die eine geometrische Modellierung für die Prozesssimulation verwendet. Für eine erfolgreiche und weit verbreitete Umsetzung dieses Ansatzes ist ein einfaches Softwaretool unerlässlich. Dies führt zu den folgenden Forschungsfragen:

- Kann die Geometriemodellierung mit Regressionsmodellen und Temperatur bezogenen Parametern erweitert werden, um die Genauigkeit des Modells zu verbessern? Kann dieses Modell zur Vorhersage der Prozessstabilität und zur frühzeitigen Vorhersage von Defekten verwendet werden? (IAPT)
- Kann ein bekanntes CAD/CAM-basiertes Softwaretool als Alternative zu komplexer FEM-Software entwickelt werden, um den Ansatz der Geometriemodellierung zu implementieren? (FVP)
- Wie lässt sich dieses Tool automatisieren, um optimierte Prozessstrategien zu entwickeln, die KMUs das "First Time Right 3D-Printing" ermöglichen? (FVP und IAPT)

1.6 Lösungsweg

Die Arbeitshypothese und die vorgenannten Forschungsziele werden systematisch durch die in Abbildung 8 schematisch dargestellte Lösungsmethodik erreicht. Das Fraunhofer IAPT konzentriert sich auf die Entwicklung des Geometriemodells für den LMD-Prozess. Dieses wird begleitet von der Entwicklung der erforderlichen Teilmodelle, des Schmelzbadmodells, des Pulverkonzentrationsmodells und des kinematischen Modells (AP3). Die FVP hingehen wird sich auf die Entwicklung eines Dexel-basierten Simulationsumgebung für die Materialauftragssimulation konzentrieren (AP4), zusammen mit erweiterten Möglichkeiten für die Ablage

und den Abruf von charakteristischen Kernwerten aus dem Geometriemodells, z.b. Schicht-höhe,-breite sowie Temperatur (AP6). Beide Institute werden verschiedene Kriterien für die Prozessabbrüche sowohl für den DED Prozess (physikalische Domäne) als auch für das Dexel-Modell (Simulationsdomäne) entwickeln, die wiederum zur Optimierung der Prozessstrategie verwendet werden (AP7). Diese Methodik wird für eine am Fraunhofer IAPT vorhandene LMD Anlage von Trumpf GmbH + Co. KG erstmal umgesetzt und validiert.



1.7 Arbeitspakete

AP	Titel	FVP, IAPT
1	Anforderungsdefinition	
Beschreibung und Ziel des Arbeitspakets		
In Zusammenarbeit mit allen Industriepartnern aus der PBA wird in diesem Arbeitspaket die Anforderungsliste für das Dexel-basierten Geometriesimulationsmodell entwickelt. Endanwender wie Hutchinson und ERLAS werden die erforderlichen Prozesskenngrößen bereitstellen, die in der Simulation bewertet werden müssen. **Ergebnis**: Anforderungen an die Dexel-basierte Geometriesimulationsmodell zusammen mit der Definition von Prozessabbruchkriterien definiert. Definition der Demonstrator Bauteile und das Material.		

AP	Titel	FVP, IAPT

2	Bereitstellung der Bahngenerierungstoolboxen	

Beschreibung und Ziel des Arbeitspakets

Im WP2 wird das bestehende Bahngenerierungsmodul von FVP und Fraunhofer IAPT adaptiert und mit den erforderlichen Algorithmen weiterentwickelt, die für die Planung von Werkzeugbahnen benötigt werden (AP 2.1). Zusätzlich zu den bestehenden Parametern wie Slicing-Pattern und Hatch-Pattern, weiteren Parametern oder Funktionen wie Segmentierung, Sequenzierung von Regionen, Definition von Start- und Endpunkten und die dazugehörigen Parametersätze werden in der Toolbox zur Bahngenerierung berücksichtigt (AP 2.2 und AP 2.3). Die optimale Prozessstrategie ist die richtige Kombination dieser Parameter für ein bestimmtes Bauteil, um das gewünschte Gefüge und die daraus resultierenden mechanischen Eigenschaften zu erreichen. Kopplung dieser Bahngenerierungstoolbox mit dem Simulation Framework wird ebenfalls in diesem AP implementiert (AP 2.4). Die folgende Abbildung zeigt Werkzeugbahnvarianten für ein dünnwandiges Bauteil als Beispiel, die erstellt werden können. Weiterhin dienen diese als Eingabe für das entwickelte Simulations-Modell, um die Variante zu wählen, welche die optimale Wärmeverteilung über den gesamten Aufbau ergibt.

Ergebnis: Toolbox zur Werkzeugbahnerzeugung mit erweiterten Funktionen, gekoppelt mit der Dexel Framework

AP	Titel	IAPT
3	Entwicklung von Teilmodellen, erforderlich für die Geometriemodellierung	

Beschreibung und Ziel des Arbeitspakets

Dieses Arbeitspaket konzentriert sich auf die Entwicklung von Teilmodellen, die für die Vorhersage der Schweißnahtgeometrie bei gegebener Zeit und gegebener Ortsauflösung erforderlich sind. Das für dieses Projekt erforderliche semi-empirische Modell wird aus 3 Teilmodellen entwickelt:

1. **Pulverkonzentrationsmodell:** Abhängig von der Düsenkonfiguration und anderen Pulverflussparametern kann das Pulverkonzentrationsmodell analytisch entwickelt werden. Da die Pulverflussparameter innerhalb eines Aufbauprozesses konstant sind, ist ein statisches Modell ausreichend (AP3.1).

2. **Prozessmodell:** Beim Prozessmodell handelt es sich im Wesentlichen um die Modellierung des Schmelzbades unter Verwendung der Massen-Energie-Bilanz Gleichungen. Prozessparameter wie Laserleistung, Energieintensitätsverteilungsprofil, Auftragsgeschwindigkeit, Spotdurchmesser und weiteres werden in dieses Modell einbezogen. Auch die Abschwächungskorrektur von Laser wird in diesem Modell berücksichtigt (AP 3.2).

3. **Robotermodell:** DED-Prozessköpfe sind in der Regel auf einem kinematischen System befestigt, das die Auftragsgeometrie durch die Beschleunigung und Abbremsung seiner Achsen an kritischen Stellen beeinflusst. Um diesem ortsabhängigen dynamischen Verhalten der Roboterachsen zu berücksichtigen, wird ein roboterspezifisches kinematisches Modell entwickelt. Dieses Modell wird dann zur Zuordnung des realen Geschwindigkeitsprofils zum Werkzeugbahn verwendet (AP 3.3).

Da es sich bei allen drei Modellen um analytische Modelle handelt, die auf mathematischen Gleichungen basieren, bilden sie den Prozess nicht vollständig ab. Daher werden mehrere Experimente durchgeführt, um mehrere Regressionsmodelle zu erhalten, die die analytischen Modelle korrigieren und genauer machen. Die Experimente umfassen eine DOE mit Prozessparametern wie Laserleistung, Auftragsgeschwindigkeit, Pulvermassenstrom, Substrattemperatur und Arbeitsabstand (AP 3.4). Die Ausgangscharakteristik der Experimente ist die Höhe, Breite und das Aspekt-verhältnis der Schweißnaht.

Ergebnis: Drei Teilmodell, das Pulverkonzentrationsmodell, das Prozessmodell und das Robotermodell sind entwickelt.

AP	Titel	FVP
4	Entwicklung eines Dexel-basierten Geometriesimulationsmodell für Materialauftrag und Materialabtrag	

Beschreibung und Ziel des Arbeitspakets

Zur grafisch-interaktiven Simulation von DED-Prozessen soll in AP 4 eine echtzeitfähige, dexel-basierte und GPU-basierte Auftragssimulation aufgebaut werden. Den Ausgangspunkt bildet hierbei die in den Projekten HisToolry und QUAPS entwickelte Materialabtragssimulation, die um boolesche Additionen mit Konvexkörpern erweitert werden soll. Hierdurch lassen sich anschließend per Addition von Kugel- oder Zylindergeometrien variabler Größe DED-Prozesse geometrisch abbilden.

Neben dem reinen Materialauftrag soll es mit dem Werkstückmodell weiterhin möglich sein, Kenngrößen an den Enden eines Dexels aufzubringen. Diese Funktion soll dann in Arbeitspaket 6 genutzt werden, um relevante Prozessgrößen auf die Oberfläche des Bauteils aufzutragen. Diese dienen dann im nächsten Schritt als Eingangsgrößen für parallel zur Dexel-Modellierung betriebenen Simulationen.

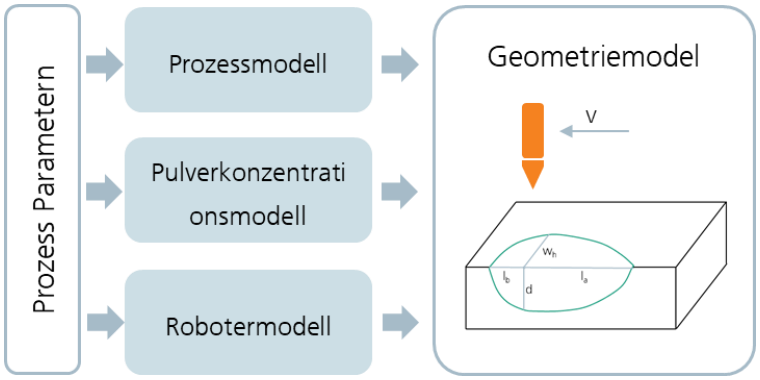
Abgeschlossen wird das Arbeitspaket mit einer Evaluierung von Speicher- und Rechenbedarf der Simulation in Abhängigkeit der angestrebten Genauigkeit. Hierbei muss sich zeigen, inwieweit mit dem geplanten Ansatz eine echtzeitfähige bzw. grafisch-interaktive Simulation möglich ist.

Ergebnis: Dexel-basierten Geometriesimulationsmodell für Materialauftrag entwickelt

AP	Titel	IAPT
5	Entwicklung des Geometriemodells und Ableitung von zeit- und ortsabhängigen Dimensionen des virtuellen Werkzeugs (3D-Schmelzbad)	

Beschreibung und Ziel des Arbeitspakets

In AP 5 wird das Geometriemodell unter Verwendung der in WP 3 entwickelten Teilmodelle sowie Regressionsmodelle als Eingaben entwickelt (AP 5.1). Ausgehend vom Prozessmodell, welches das Schmelzbadmodell mit dem Laserabschwächungskorrektur enthält, kann die Schmelzbadgeometrie abgeleitet werden. Durch Überlagerung des Schmelzbades mit dem Pulverkonzentrationsmodell können Auftragshöhe und Breite geschätzt werden, indem in jedem Zeitschritt eine Massenbilanz erstellt wird. Das kinematische Modell verfeinert das zeit- und positionsabhängige Schmelzbad nochmal unter Berücksichtigung der Beschleunigung und Abbremsung der kinematischen Achsen entlang des Werkzeugbahn, insbesondere in Geometrie wie L-, T- und X-förmigen Querschnitten (AP 5.2). Das Ergebnis der Integration all dieser Modelle ist das Geometriemodell, das die Schweißnahthöhe und -breite mit höherer Genauigkeit vorhersagt. Die in AP2 erzeugten Werkzeugbahnen werden dafür verwendet (AP 5.3).



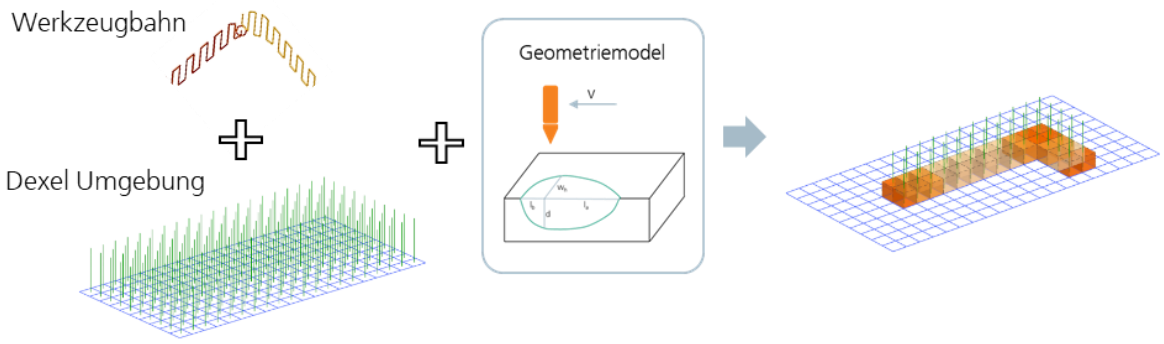
Ergebnis: Vollständig funktionsfähiges und validiertes Geometriemodell entwickelt.

AP	Titel	FVP, IAPT
6	Erweiterung des Dexel-basierten Geometriesimulationsmodell mit Ablage und Abrufen von charakteristischen Kerngrößen	

Beschreibung und Ziel des Arbeitspakets

Das in AP 4 entwickelte Dexel-basierte Framework wird mit dem in AP 5 entwickelten Geometriemodell gekoppelt und für die Auftragssimulation des Werkzeugwegs für die gesamte Schicht und dann für das gesamte Teil verwendet (AP 6.1). Dies beinhaltet die Entwicklung und Umsetzung der Umgebung zur Durchführung einer zeit- und Position-abhängigen Dexel-basierten Simulation sowie die Datenbankstruktur zur Ablage und zum Abruf von Prozess Information wie Layer Nummer, Prozess Parametern, Temperatur und Schichthöhe für einzelne Dexel (AP 6.2). Die folgende Abbildung zeigt eine exemplarische Darstellung des

dexel-Modells einer DED-Geometrie. Weiterhin werden das Speicherbedarf und Laufzeitverhalten für Demonstratoren evaluiert (AP 6.3).



Ergebnis: Geometriemodell mit Dexel Framework gekoppelt. Werkzeugbahn basierte Auftragssimulation des gesamtes Demonstrator Bauteil durchgeführt.

AP	Titel	FVP, IAPT
7	Prozessabbruchkriterien für das Geometrie Modell und Ermittlung der optimalen Prozessstrategie	

Beschreibung und Ziel des Arbeitspakets

Auf der Grundlage des Geometriesimulationsmodells wird eine schichtweise Bewertung der charakteristischen Merkmale des Prozesses durchgeführt. Kenngrößen wie durchschnittliche, maximale und minimale Schichthöhe, wärmebeeinflusste Zonen, Abkühlungsrate und Arbeitsabstand werden erstmal ermittelt (AP 7.1). Weiterhin werden die Bindefehler zwischen angrenzenden Schweißnähten abgeleitet (AP 7.2). Diese charakteristischen Kennwerte dienen der Analyse der Prozessstabilität in die virtuelle Domäne. Zur Bewertung dieser charakteristischen Merkmale werden die in AP3 durchgeführten Experimente und Wissen, das im Rahmen verschiedener anderer Projekte des IAPT gesammelt wurde herangezogen. Die notwendige Bewertungsalgorithmen und das Abbruchkriterien für die oben genannten Kenngrößen werden in diesem AP entwickelt (AP 7.3).

Überschreiten die Kenngrößen den vorgegebenen Wert, wird der virtuelle Prozess abgebrochen. Mehrere benutzerdefinierte Prozessstrategien (einschließlich verschiedener Werkzeugbahnmöglichkeiten) aus AP 2 werden virtuell simuliert. Anschließend werden die Prozessparameter wie Schichtdicke, Überlappungsgrad zwischen den Schweißlinien, Sequenzierung usw. korrigiert und für den realen 3D-Druck ausgewählt. Das Arbeitspaket wird sich auch mit den Schritten befassen, die für die Automatisierung dieses Schrittes der Prozessstrategieauswahl erforderlich sind. Ziel dieses Projekts ist jedoch zunächst die Entwicklung des neuen Simulationsansatzes.

Ergebnis: Bewertungsmethoden für abgeleitete Prozessmerkmale entwickelt. Prozessabbruchkriterien definiert und in das Simulationsmodell integriert

AP	Titel	FVP, IAPT
8	Validierung des Geometriemodells	

Beschreibung und Ziel des Arbeitspakets

Das entwickelte Geometriemodell wird zusammen mit den Bewertungskriterien für die Prozessstabilität für verschiedene Bauteilgruppen, nämlich dünnwandige Bauteile und großvolumige Bauteile mit einem Bauvolumen von 100 x 100 x 50 mm3 und 250 x 250 x 100 mm3 eingesetzt (AP 8.1). Der Auftragsprozess dieser Bauteile wird virtuell simuliert und anschließend mit der am Fraunhofer IAPT vorhandenen Trumpf-LMD-Anlage aufgebaut (AP 8.2). Die gefertigten LMD-Bauteile werden anschließend mit einer Koordinatenmessmaschine auf ihre geometrische Genauigkeit vermessen (AP 8.3). Die gemessenen geometrischen Eigenschaften werden mit den Simulationsergebnissen verglichen und der Fehler evaluiert (AP 8.4).

Ergebnis: Validierung und Fehlerschätzung des Geometriemodells mit den Demonstrator-Komponenten durchgeführt

2 Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

2.1 Arbeitspaket 1: Anforderungsdefinition

Im vorliegenden Arbeitspaket wurde die Anforderungsspezifikation für ein dexelbasiertes Geometriesimulationsmodell systematisch erarbeitet. Die Definition erfolgte in enger Abstimmung mit dem projektbegleitenden Ausschuss auf Grundlage strukturierter Expertendiskussionen. Dabei wurde eine klare Trennung zwischen funktionalen und nicht-funktionalen Modellanforderungen sowie der Festlegung von prozessbedingten Abbruchkriterien vorgenommen.

Anforderungen für das Dexel-basierten Geometriesimulationsmodel

Für das zu entwickelnde Simulationsmodell wurden folgende technische Anforderungen spezifiziert:

- Repräsentation der Bauteilgeometrie mittels einer volumetrischen Dexelstruktur
- Parametrierbare Simulationsauflösung durch skalierbare Voxelzellgrößen
- Plattformunabhängige Ausführbarkeit durch containerbasierte Bereitstellung der Simulationsumgebung
- Umsetzung auf Basis frei verfügbarer Open-Source-Softwarekomponenten
- Abbildung unterschiedlicher Auftrags- und Bahnstrategien innerhalb des additiven Fertigungsprozesses
- Berücksichtigung relevanter Prozessparameter, insbesondere Laserleistung, Auftragsgeschwindigkeit und Pulvermassenstrom
- Gewährleistung kurzer Rechenzeiten mit einer maximalen Simulationsdauer von 30 Minuten für das definierte Demonstratorbauteil
- Erweiterte Modellfunktionalität zur getrennten Abbildung von Hatch- und Boundary-Pfaden

Definition von DED Prozessabbruchkriterien

Zur Bewertung der Prozessstabilität sowie zur Detektion kritischer Prozesszustände wurden folgende Abbruchkriterien definiert, bei deren Auftreten ein vorzeitiger Abbruch der Simulation vorgesehen ist:

- Thermische Überhitzung des Schmelzbades
- Abweichung des Arbeitsabstands außerhalb des zulässigen Fokusbereichs (Out-of-Focus-Zustand)
- Auftreten von Kollisionen zwischen Systemkomponenten und mit bereits gefertigte Bauteilsegmente
- Signifikante Abweichungen des realisierten Roboterpfades vom Soll-Pfad
- Schichtentrennung (Delamination) zwischen aufeinanderfolgenden Materiallagen
- Unzulässige Überlappungen im Bauteilaufbau
- Abweichungen der geometrischen Kenngrößen der Schweißraupe (Schweißnahthöhe und -breite)
- Übersprühungen von Pulver außerhalb des vorgesehenen Auftragsbereichs (Overspray)
- Instabilitäten im Pulvermassenstrom
- Rissbildung in den unteren bzw. bereits erstarrten Bauteilschichten

Anlage und System Setup

Im Rahmen des Forschungsprojekts DexPro wurde zur systematischen Identifikation und Modellierung relevanter Prozessparameter ein pulverbasiertes Laser Metal Deposition (LMD) Verfahren ausgewählt. Als

Versuchsanlage kam eine TRUMPF TruLaser Robot Series 5020 am Fraunhofer IAPT zum Einsatz, die mit einem hochpräzisen sechachsigen Industrieroboter KR60HA der KUKA AG ausgestattet ist (siehe Abbildung 5). Zur Geometrieerzeugung ist die Fertigungszelle mit einem Drei-Düsen-Auftragskopf sowie einer Pulverförderanlag ausgerüstet, welche das metallische Pulver dem Düsenkopf zuführt. Die Pulverversorgungseinheit verfügt über bis zu vier Pulverbehälter, die jeweils mit einer rotierenden Dosierscheibe mit gefräster Dosiernut ausgestattet sind. Durch die Rotation dieser Scheibe werden definierte Pulvermengen aus dem pulverbehälter entnommen. Die so dosierten Pulverpartikel werden anschließend mittels eines Trägergases (Argon/Helium) über pneumatische Linie zum Auftragskopf transportiert. Die zugeführte Pulvermassenstromrate wird dabei durch die Drehzahl der Dosierscheibe sowie die Geometrie der Dosiernut gesteuert. Als Laserstrahlquelle wird ein TRUMPF TruDisk 6001 eingesetzt, ein Scheibenlaser mit einer maximalen Ausgangsleistung von 6 kW. Das aktive Lasermedium ist Yb:YAG, welches eine Laserstrahlung mit einer Wellenlänge von 1030 nm emittiert. Die technischen Spezifikationen des beschriebenen Systemaufbaus sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

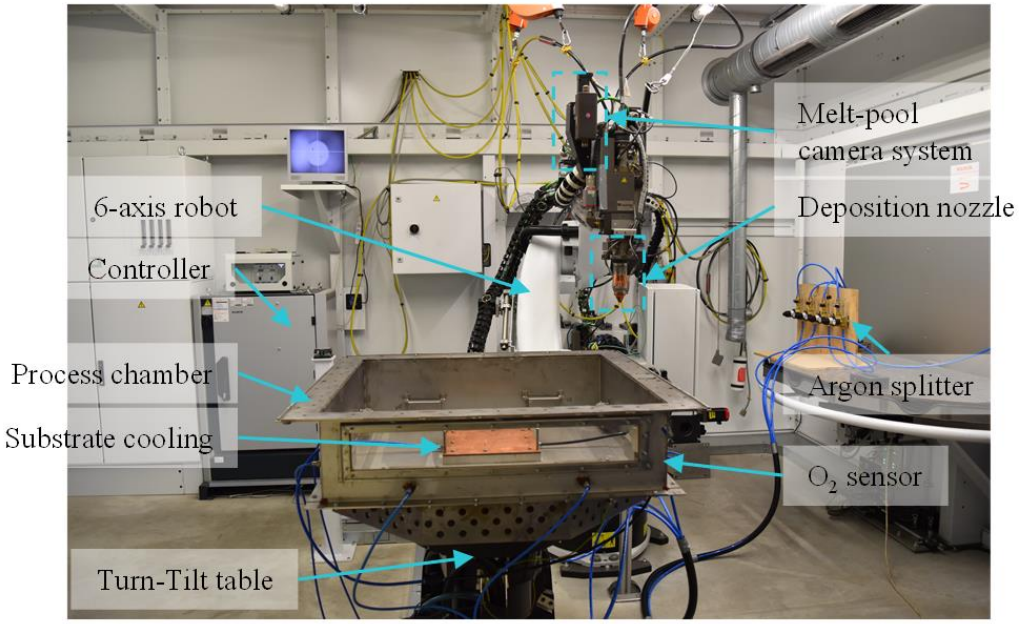


Abbildung 5 LMD System Setup

Tabelle 1 Technische Spezifikationen des LMD-Systemaufbaus

System Parameter	Unit	Value/ Range
Laser generator		
Source type	-	Yb:YAG disk laser
Power	W	500 - 6000
Wavelength	nm	1030
Fiber diameter	µm	200
Beam quality	mm. mrad	4
Powder delivery system - Deposition Line		
Powder containers	-	2
Powder mass flow rate	g/min	≤ 16.5
Carrier gas	l/min	≤ 20
Shield gas	l/min	≤ 20

Fiber diameter	µm	100
Focal length	mm	150
Focal diameter	mm	0.4 - 6
Positioning system - KUKA robot KR 60 HA		
Number of axis	-	6 + 2
Reachability (max)	mm	2429
Weight	kg	655
Repeatability	mm	± 0.05
Payload (max)	kg	30
Controller	-	KR C2

Werkstoff Auswahl

Als Werkstoff wurde in der vorliegenden Forschungsarbeit die in der Luft- und Raumfahrtindustrie weit verbreitete Titanlegierung Ti-6Al-4V eingesetzt. Diese α+β-Titanlegierung zeichnet sich durch eine vorteilhafte Kombination aus hoher spezifischer Festigkeit, guter Ermüdungsbeständigkeit sowie ausgezeichneter Korrosionsbeständigkeit aus. Aufgrund der vergleichsweise hohen Material- und Zerspanungskosten von Titanlegierungen eignet sich Ti-6Al-4V in besonderem Maße für den Einsatz in additiven Fertigungsverfahren, bei denen eine materialeffiziente Bauteilherstellung möglich ist. Darüber hinaus weisen strukturelle Luftfahrtbauteile typischerweise ein hohes Buy-to-Fly-Verhältnis auf, was zu erheblichen Mengen an Titanverschnitt führt, der derzeit nur eingeschränkt recycelt wird. Die Materialeigenschaften und Spezifikationen des in diesem Projekt verwendeten Ti-6Al-4V-Pulvers sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Tabelle 2 Spezifikationen des Ti-6Al-4V-Pulvers

Material Parameter	Unit	Value/ Range
Alloy	-	Ti-6Al-4V
Grade	-	ASTM Gd 5
Atomization	-	Gas (Ar)
Powder size	µm	50 -100
Powder shape	-	spherical
Flowability	s/50 g	< 28 s/50 g

Demonstratoren Auswahl

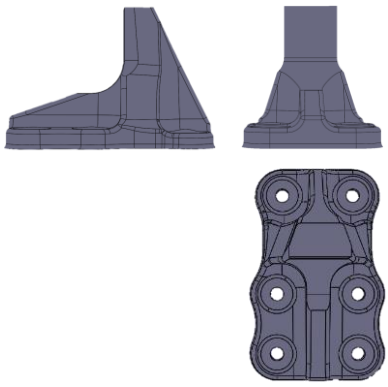


Abbildung 6 Demonstrator Bauteil

Als eine der Demonstrator-Bauteil wurde das in Abbildung 6 dargestellte Modell eines Türstoppers ausgewählt. Die Wahl fiel auf dieses Bauteil, da es durch seine Geometrie viele verschiedene Fälle abbildet, die im Zuge der Simulation sowie Prozessierung wichtig sind (Bohrungen, partielle Erhöhungen, Verrundungen, etc.).

2.2 Arbeitspaket 2: Bereitstellung der Bahngenerierungstoolboxen

In Arbeitspaket 2 wurde das bestehende Bahngenerierungstool funktional erweitert. Das Tool ermöglicht nun die schichtweise Zerlegung (Slicing) eines dreidimensionalen CAD-Modells sowie die Generierung von Pfaden innerhalb der einzelnen Schichten, die anschließend von der Prozesskinematik abgefahren werden. Auf diese Weise wird der schichtweise Aufbau von dreidimensionalen Bauteilen durch metallischen Materialauftrag realisiert. Die für dieses Projekt erforderlichen Schnittstellen und Funktionalitäten basieren auf den Ergebnissen vorangegangener Entwicklungsarbeiten, in denen ein institutseigenes Slicing-Tool entwickelt wurde. Dieses Werkzeug wurde unter Verwendung des Open-Source-Geometriekerns Open Cascade Technology (OCCT) implementiert. Die Softwareentwicklung erfolgte in einer Python-Umgebung, ergänzt durch die Implementierung einer grafischen Benutzeroberfläche (GUI) auf Basis der Qt- und PyQt-Bibliotheken. Die GUI erlaubt die Eingabe sämtlicher für den Slicing- und Fertigungsprozess relevanter Parameter und bietet darüber hinaus die Möglichkeit zum Import von STEP CAD-Daten. In einem zweiten Visualisierung Applikation werden die generierten Ergebnisse visualisiert, wobei sowohl eine dreidimensionale Darstellung der geslicten Geometrie als auch zweidimensionale ‚Slices' zur Verfügung stehen. Innerhalb des Softwareframeworks wurden verschiedene Strategien zur Werkzeugbahn- bzw. Pfadgenerierung implementiert, um unterschiedliche Auftragskonzepte abbilden zu können. Die Abbildungen Abbildung 7 und Abbildung 8 zeigen exemplarische Screenshots des Bahngenerierungstools anhand des ausgewählten Demonstratorbauteile.

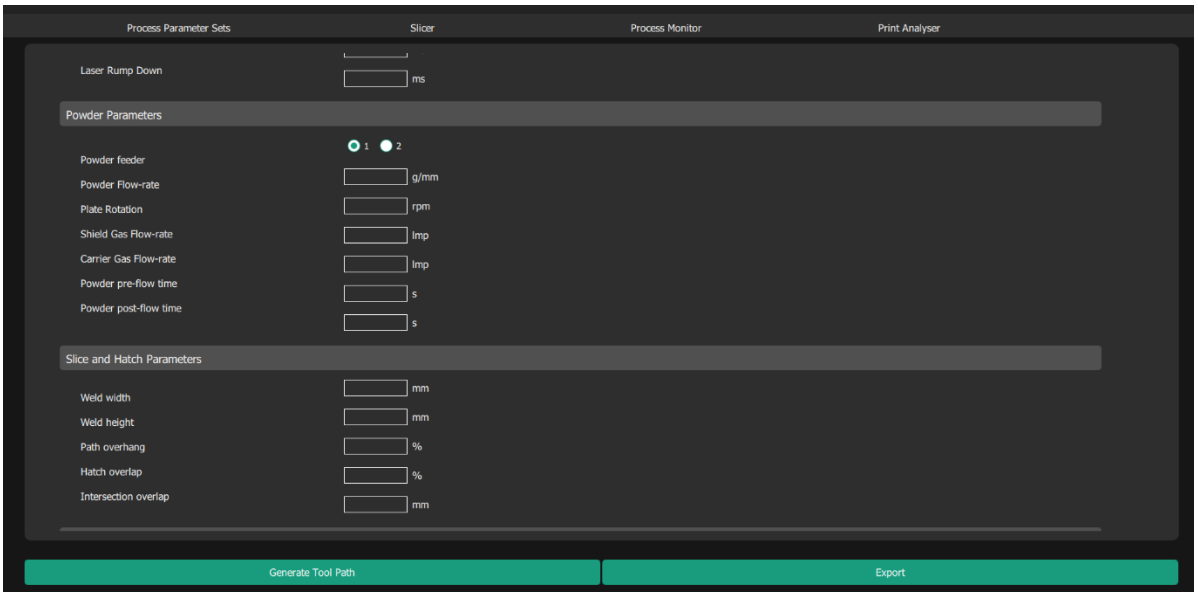


Abbildung 7 Screenshot der intern entwickelten Slicer-Toolbox für die Parametereingabe

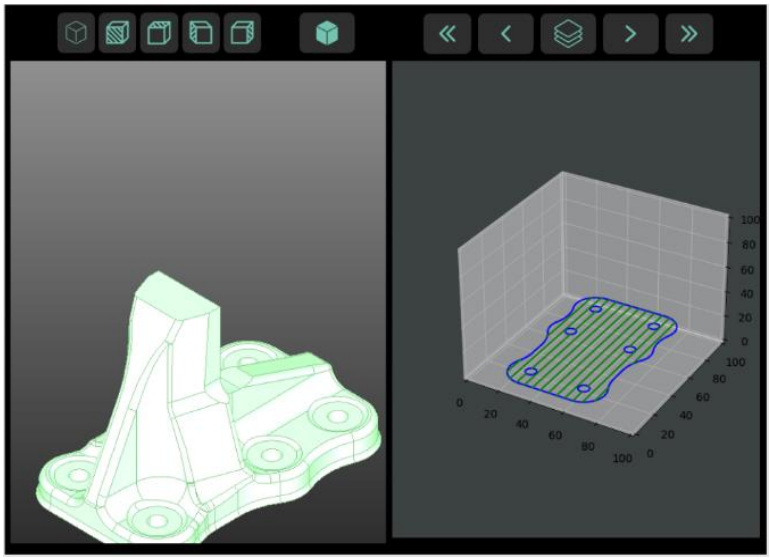


Abbildung 8 2D- und 3D-Visualisierungstoolbox

Abbildung 9 stellt dabei die einzelnen Schichten sowie die Generierung der werkzeugbahnen. Die Abbildung 123 zeigt eine detaillierte Ansicht einer der Schichten mit extrahierten bzw. generierten Features wie ‚Boundary paths' und ‚Hatch lines'. Die ‚Boundary paths' wird als Kante dargestellt, die aus einer Menge miteinander verbundener Kurvenelemente besteht.

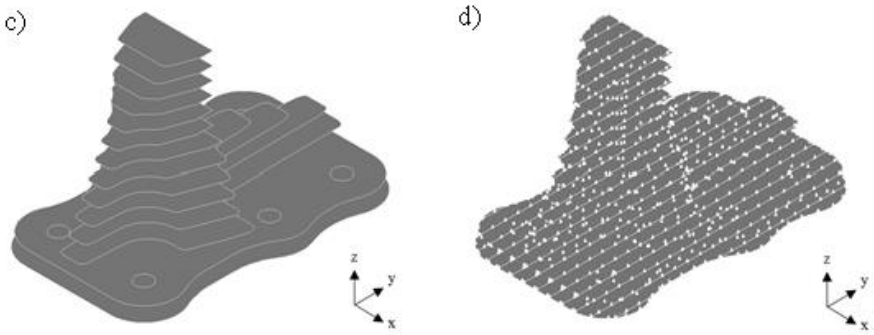


Abbildung 9 Implementierung des Slicer-Algorithmus an der Demonstratorgeometrie

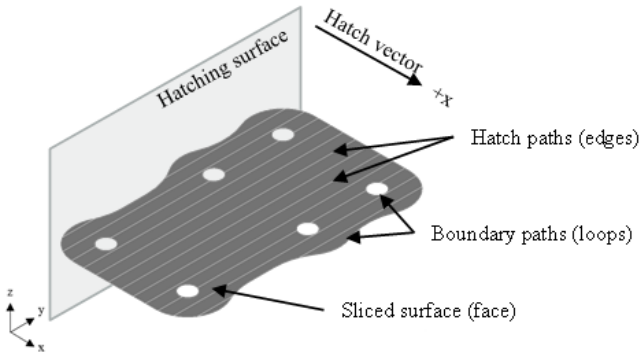


Abbildung 10 Darstellung der gesliceten Oberfläche als ‚Boundary path' und ‚Hatch lines'

Das entwickelte Toolbox wurde an einer zweiten Demonstratorgeometrie getestet, die in der Abbildung 11 dargestellt ist. Im Slicing Toolbox wurden vier verschiedene Ansätze zur Werkzeugpfadgenerierung

implementiert, deren Ergebnisse in Abbildung 12 gezeigt sind. Da der Werkzeugpfad einen direkten Einfluss auf die Baugeometrie sowie auf die damit verbundenen Defekte und die Qualität der hergestellten Geometrie hat, werden häufig Bauteil-spezifische Strategien zur Werkzeugpfadgenerierung eingesetzt.

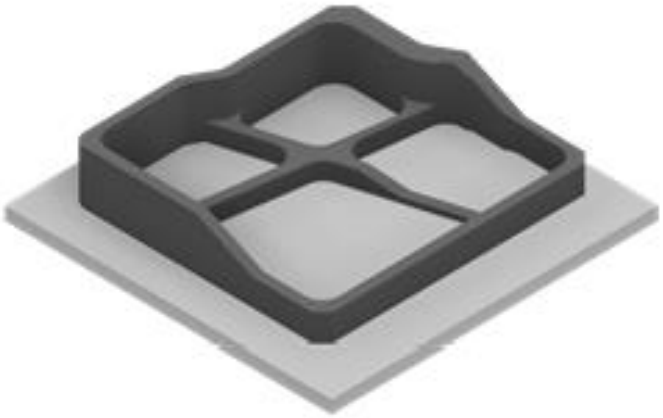


Abbildung 11 Demonstrator Geometrie aus dem Luft- und Raumfahrtsektor

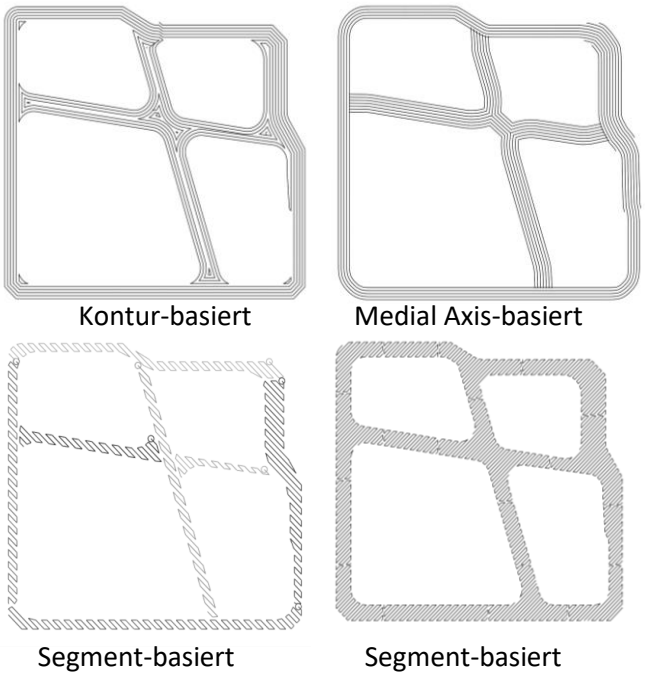


Abbildung 12 Implementierung von vier verschiedenen Werkzeugpfad-Generierungsstrategien am Demonstratorbauteile

Daten Austausch Format

Um das Bahngenerierungstool an das Dexel Simulation Framework (AP5) zu koppeln, wird ein **.xml-Dateiformat** aus dem Generierungstool extrahiert. Mithilfe dieses Formats können die im Bahngenerierungstool festgelegten Parameter und Geometrie Informationen an das Simulation Framework übergeben werden, sodass diese in der Simulation berücksichtig werde. Da es sich um ein eigens entwickeltes .xml-Dateiformat handelt, ist der gesamte Prozess weiterhin unabhängig von kommerzieller Software, wodurch keinerlei Lizenzkosten anfallen. Ein Ausschnitt aus einer exportieren .xml-Datei ist in Abbildung 13 dargestellt.

```
<layers>
  <!--  List of layers which define the process  -->
  <layer>
    <!--  Number of the layer  -->
    <number>1</number>
    <!--  List of paths which define the layer  -->
    <paths>
      <path>
        <id>1</id>
        <!--  List of targets (pose 6DF) which define the path  -->
        <targets>
          <target>
            <id>1</id>
            <translation>
              <!--  Translation is defined in mm  -->
              <x>432.312</x>
              <y>312.212</y>
              <z>12312.321</z>
            </translation>
            <rotation>
              <!--  Rotation is defined in radian  -->
              <rx>0.587</rx>
              <ry>0.213</ry>
              <rz>1.231</rz>
            </rotation>
            <!--  Specs is a list of key value pairs for arbitrary data  -->
            <specs>
              <spec>
                <name>spec name</name>
                <value>spec value</value>
              </spec>
            </specs>
          </target>
        </targets>
      </path>
    </paths>
  </layer>
</layers>
```

Abbildung 13 XML-Dateiformatstruktur für den Datenaustausch

2.3 Arbeitspaket 3: Entwicklung von Teilmodellen, erforderlich für die Geometriemodellierung

Dieses Arbeitspaket befasste sich mit der Entwicklung der für die Vorhersage der Schweißnahtgeometrie erforderlichen Teilmodelle bei definierter zeitlicher und räumlicher Auflösung. Der pulverbasierten Auftragsprozess wird dabei durch folgende Prozess-Teilmodelle abgebildet:

1. Prozessmodell (Schmelzbadmodellierung)
2. Roboterkinematikmodell
3. Pulverkonzentrationsmodell (Materialmodellierung)

Prozessmodell

In dieser Forschungsarbeit wurde die pulverbettbasierte Laserpulverauftragschweißtechnik (LMD), wie in Abschnitt 2.1 geschrieben, zur Implementierung und Untersuchung verschiedener Algorithmen sowie der entwickelten Methodiken eingesetzt. Die Prozessmechanik des LMD-Verfahrens wird in diesem Abschnitt kurz beschrieben, während der Systemaufbau bereits in Abschnitt 2.1 beschrieben ist. Der Laser-Metall-Auftragschweißprozess ist ein mehrlagiger, kontinuierlicher Schweißprozess, bei dem eine Laserquelle zur Erzeugung dreidimensionaler Strukturen verwendet wird [22, 23]. Der sogenannte Auftragskopf ist mit optischen Elementen ausgestattet, die den Laserstrahl auf das Substrat (bzw. die Grundplatte) fokussieren. Gleichzeitig werden Metallpulverpartikel koaxial über ein Düsensystem in den Prozessbereich eingebracht. Die eingebrachte thermische Energie erzeugt ein Schmelzbad, das anschließend rasch erstarrt.

Durch das Verfahren des Auftragskopfes entlang einer vorgegebenen Bahn in Kombination mit einem Laserregelungssystem lassen sich dreidimensionale Strukturen schichtweise aufbauen. Der Auftragskopf ist dabei typischerweise an einem kinematischen System montiert, beispielsweise an einem 3-Achs-Portalsystem oder einem 6-Achs-Industrieroboter. Das Substrat besteht in der Regel aus einer Grundplatte desselben Materials oder einer Legierung des aufzutragenden Werkstoffs. Abbildung 14 zeigt eine schematische Darstellung des

LMD-Prozesses mit den zugehörigen Koordinatensystemen: dem Werkstückkoordinatensystem (WCS), dem Roboterkoordinatensystem (RCS) und dem Werkzeugkoordinatensystem (TCS).

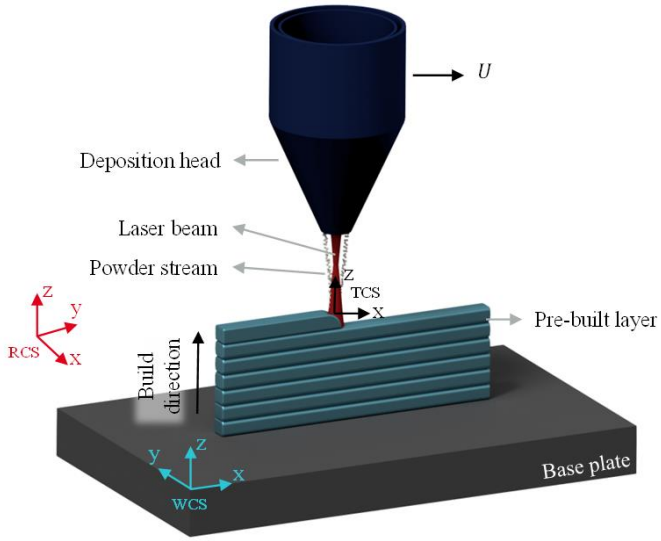


Abbildung 14 Schematische Darstellung des Funktionsprinzips des LMD-Prozesses

Die Fertigung mittels LPA umfasst die folgenden aufeinanderfolgenden physikalischen Phänomene: Laserabsorption, Wärmeleitung, Zuführung des Metallpulvers, Aufschmelzen sowie schnelle Erstarrung. Die thermische Energie, die beim Auftreffen des Lasers auf das Substrat entsteht, wird vom Substrat absorbiert und führt zur Bildung eines Schmelzbads. Der Metallpulverpartikelstrom, der in den Prozessbereich eingebracht wird, absorbiert dabei einen Teil dieser Energie, bevor er in das Schmelzbad übergeht [24]. Zur Modellierung dieser Prozessphase wird eine Wärmeleitungsgleichung verwendet.

Der während des Auftragsprozesses eingesetzte gaußförmige Laserstrahl weist eine maximale Energieintensität im Strahlzentrum auf, die in radialer Richtung abnimmt. Dadurch entsteht auf der Oberfläche des Schmelzbads ein Temperaturgradient, der wiederum einen Gradienten der Oberflächenspannung (σ) verursacht. Infolgedessen bildet sich eine konvektive Strömung innerhalb des Schmelzbads aus, die das geschmolzene Material vom zentralen Bereich mit niedriger Oberflächenspannung (σ_c) zu den Randbereichen mit höherer Oberflächenspannung ($\sigma_c + \Delta\sigma$) transportiert. Diese durch Oberflächenspannung angetriebene Konvektion wird als Marangoni-Konvektion bezeichnet (siehe Abbildung 15) [25]. Diese Prozessphase wird mithilfe der Impuls-, Wärmeübertragungs- und Kontinuitätsgleichungen beschrieben. Die instationäre Temperaturverteilung an einem beliebigen Ort und zu einem beliebigen Zeitpunkt, definiert durch T(x, y, z, t), ergibt sich aus der dreidimensionalen Wärmeleitungsgleichung, wie in den unten beschriebene Gleichungen dargestellt [26].

$$\frac{\partial(\rho c_p T)}{\partial t} + \nabla.\left(\rho c_p U T\right) - \nabla.(K \nabla T) = Q \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial T} + (\rho U \nabla) U = \rho g - \nabla p + \mu \nabla.(\nabla U) \quad (2.2)$$

Q, power generation per unit volume of the substrate $[W/m^3]$
K, thermal conductivity $[W/mK]$
C_p, specific heat capacity $[J/kg.K]$
ρ, density, $[kg/m^3]$
U, process velocity $[m/s]$
g, gravitational field $[m/s^2]$
μ, viscosity $[kg/s.m]$
p, pressure $[N/m^2]$

Thermomechanische Modelle werden eingesetzt, um den schichtweisen Materialauftrag hinsichtlich Temperaturverteilung, Abkühlraten sowie der daraus resultierenden Verformungen und Eigenspannungen zu simulieren [27]. Zur Abbildung des thermischen Prozessverhaltens und zur Vorhersage der entstehenden Mikrostruktur, welche maßgeblich die Materialeigenschaften des Bauteils bestimmt, wurden verschiedene analytische und numerische Ansätze, wie die Finite-Elemente-Modellierung, entwickelt. Diese Modelle sind in der Regel als Funktion primärer Prozessparameter wie Energieintensität und Materialzufuhr formuliert [28–31]. Prozessmodelle und Simulationen tragen wesentlich zu einem tieferen Verständnis des Fertigungsprozesses bei und ermöglichen die Optimierung der Prozessparameter zur Sicherstellung der Prozessstabilität sowie zur Erreichung der geforderten statischen und dynamischen mechanischen Eigenschaften [32,33]. So können beispielsweise der kumulierte Wärmeeintrag während des gesamten Bauprozesses sowie die mit zunehmender Bauhöhe abnehmende Wärmeableitung über die Grundplatte im Vorfeld simuliert werden. Auf dieser Grundlage lässt sich ein optimierter, schichtweise adaptiver Energieeintrag entwickeln [34]. Das Projekt DexPro konzentriert sich auf die Implementierung der geometrischen Charakteristika des erzeugten Schmelzbads bzw. der Geometrie, legt jedoch die Grundlage und entwickelt ein Modell zur Erweiterung des Dexel-Modells zur Temperaturvorhersage.

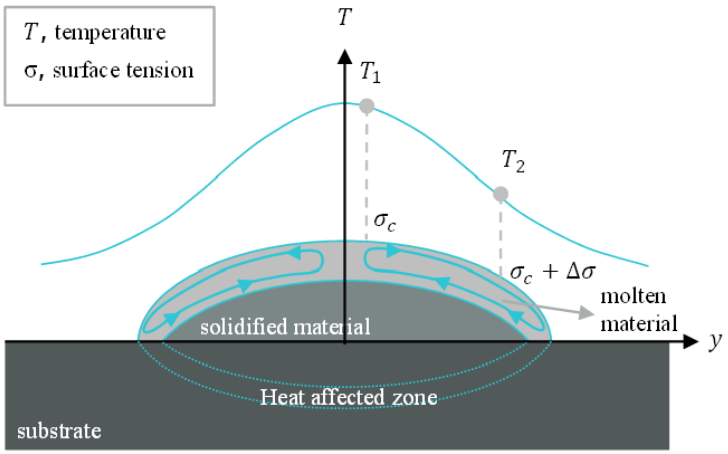


Abbildung 15 Schematische Darstellung der Schmelzbad-dynamik und des sogenannten Marangoni-Effekts

Obwohl Simulationsmodelle Prozesseigenschaften bis zu einem gewissen Grad vorhersagen und Prozessparameter optimieren können, werden die Vielzahl intrinsischer und extrinsischer Prozessparameter sowie deren Wechselwirkungen in diesen Modellen nicht vollständig berücksichtigt. Dies kann zu Abweichungen im realen Prozess führen [35]. Eine zentrale Annahme thermomechanischer Modelle ist eine vorab festgelegte und konstante Geometrie der aufgetragenen Schicht, insbesondere der Schweißraupenabmessungen wie Breite und Höhe. Sich während des Auftragsprozesses ändernde thermomechanische Randbedingungen

führen jedoch zu variierenden Schichthöhen und -breiten über die Bauhöhe hinweg sowie an bestimmten geometrischen Merkmalen, etwa an Ecken oder Kreuzungspunkten. An diesen Stellen variiert die tatsächliche Auftragsgeschwindigkeit infolge von Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgängen des kinematischen Systems oder durch Materialüberlagerungen. Dies hat zur Folge, dass sich die Auftragsdüse entweder zu nahe oder zu weit von den zuvor aufgebauten Schichten befindet und somit vom idealen Arbeitsabstand abweicht [35]. Demgegenüber wird die CAD-Geometrie üblicherweise mit einer konstanten Schichtdicke gesliced, und die Werkzeugbahnen werden mit einem festen, vorab definierten z-Versatz generiert. Eine Abweichung des Arbeitsabstands vom idealen Wert führt dazu, dass der Pulverstrom nicht mehr an der vorgesehenen Position konvergiert und sich zudem die Energieverteilung des Laserstrahls verändert. Infolgedessen ändern sich das Auftragsvolumen und die Geometrie des abgeschiedenen Materials, was letztlich zu Prozessinstabilitäten bis hin zum Abbruch des Bauprozesses führen kann. Diese spezifische Prozessdynamik wird in diesem Projekt digital mithilfe eines Dexel-Modells nachgebildet. Eine schematische Darstellung dieses Zusammenhangs ist in Abbildung 16 dargestellt.

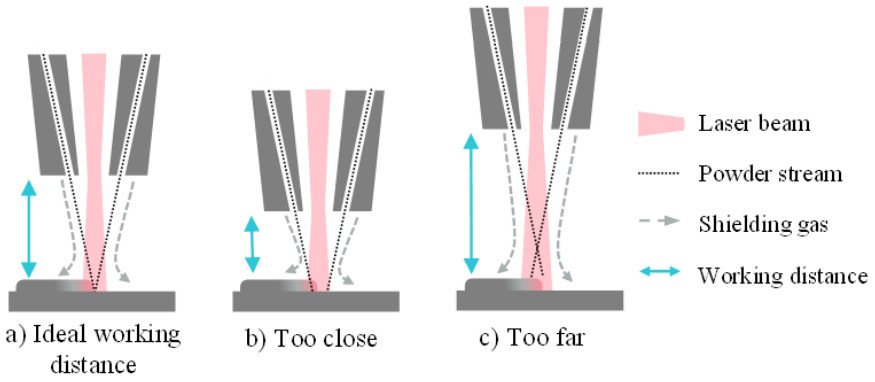


Abbildung 16 Schematische Darstellung des Parameters „Arbeitsabstand“ im Kontext der aufgetragenen Geometrie

Roboterkinematikmodell

Da in diesem Projekt ein kinematisches System in Form eines 6-achsigen Industrieroboters eingesetzt wird, wurde ein entsprechendes kinematisches Modell entwickelt, das der Simulation sowohl Vorwärts- als auch Inverskinematik Informationen bereitstellt. Auf Basis der vom Slicer (AP2) generierten Werkzeugbahn ist das Modell in der Lage, die Gelenkgeschwindigkeiten sowie die Geschwindigkeiten des Tool Center Points (TCP) zu berechnen und darüber hinaus das Auftreten kinematischer Singularitäten zu überprüfen. Dieser Abschnitt beschreibt das im Rahmen der Modellierung des Laser-Metall-Auftragschweißprozesses entwickelte kinematische Modell.

Zu Beginn wurde ein Robotermodell in Python (Version 3.7.7) erstellt. Die Python-Bibliothek pybotics stellt eine integrierte Roboter Datenmodelle bereit, in der mehrere Standardrobotermodelle vordefiniert sind. Innerhalb dieser Datei wurde zunächst ein Modell des KUKA-KR60-Roboters unter Verwendung der *modifizierten Denavit-Hartenberg-Parameter* implementiert. Die DH-Parameter wurden auf Basis der geometrischen Abmessungen des Roboters berechnet, wobei die Ausrichtung der Gelenkachsen aus dem KUKA-Roboterhandbuch und am IAPT vorhandene System übernommen wurde (Abbildung 17). Zusätzlich wurden die Bewegungsgrenzen der einzelnen Gelenke im Modell definiert. Hierzu wurden die modifizierten Denavit-Hartenberg-Parameter (DH-Parameter) berechnet und die in der Bedienungsanleitung des KUKA KR60 angegebenen Gelenkgrenzen verwendet (Abbildung 18). Anschließend wurde das Modell anhand von Messdaten des realen KUKA-KR60-Roboters am Fraunhofer IAPT verifiziert.

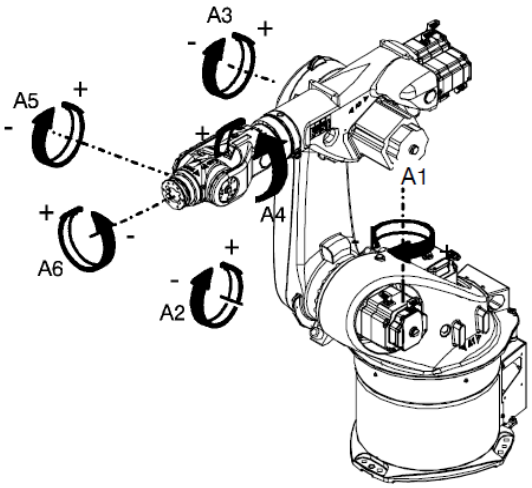


Abbildung 17 Schematische Darstellung des für die Modellierung verwendeten KUKA KR 60-Roboters

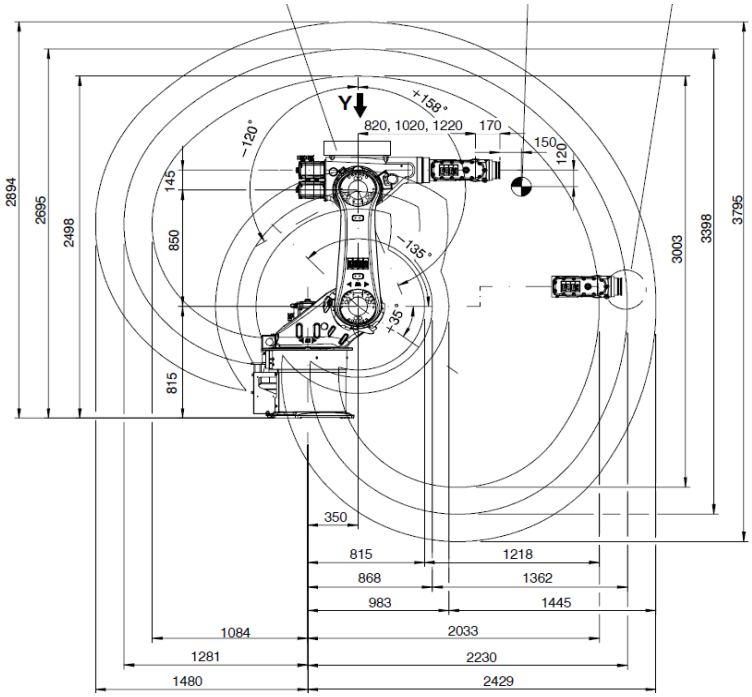


Abbildung 18 Achsdefinitionen und -grenzen des ausgewählten KUKA KR 60-Roboters

Tabelle 3 beschreibt die Denavit-Hartenberg-Parameter (DH-Parameter) des ausgewählten KUKA KR 60 Roboters. Diese Parameter werden verwendet, um die kinematische Struktur eines seriellen Roboters mathematisch zu modellieren und die Vorwärts- sowie Inverskinematik zu berechnen.

Für jedes der sechs Gelenke (i = 1–6) werden vier Parameter definiert:

1. α_i (alpha): Verdrehwinkel zwischen zwei aufeinanderfolgenden z-Achsen (Rotation um die x-Achse)
2. a_i: Abstand zwischen zwei z-Achsen entlang der x-Achse (Gliedlänge)
3. θ_i (theta): Gelenkwinkel (Rotationsvariable bei einem 6-Achs-Industrieroboter)
4. d_i: Versatz entlang der jeweiligen z-Achse

Der Roboter besitzt 6 Rotationsachsen, weshalb θ_1 bis θ_6 die variablen Gelenkkoordinaten darstellen. Die Parameter a_2 = 350 mm und a_3 = 850 mm beschreiben die Hauptlängen des Ober- und Unterarms. Die

negativen d-Werte (z. B. $d_1 = -815$ mm, $d_4 = -820$ mm, $d_6 = -170$ mm) geben die vertikalen Versätze innerhalb der Struktur an. Die konstanten Winkelterme wie $-\pi/2 + \theta_3$ oder $\pi + \theta_4$ berücksichtigen die konstruktive Orientierung der Achsen im Roboteraufbau. Diese DH-Parametrisierung bildet die Grundlage für:

- die Berechnung der Transformationsmatrizen zwischen den Koordinatensystemen
- die Bestimmung der TCP-Position (Tool Center Point)
- Simulation, Bahnplanung und Modellierung des Roboters im Rahmen des Projekts

Damit ist die vollständige kinematische Beschreibung des Roboters für die weitere Modellierung gegeben.

Tabelle 3 Denavit-Hartenberg-Parameter (modifizierte DH-Parameter) des ausgewählten KUKA KR 60-Roboters

Link (i)	α (alpha)	a [mm]	θ (theta)	d [mm]
1	π	0	θ_1	-815
2	π/2	350	θ_2	0
3	0	850	$-\pi/2 + \theta_3$	0
4	π/2	145	$\pi + \theta_4$	-820
5	π/2	0	θ_5	0
6	-π/2	0	θ_6	-170

Die Abbildung 19 Abbildung 19 Gelenkrahmen für die Berechnung der DH-Parameterzeigt die Gelenkrahmen (Koordinatensysteme) des Roboters, die zur Bestimmung der Denavit-Hartenberg-Parameter (DH-Parameter) definiert wurden. Beschreibung der Darstellung folgt:

- Jedem Gelenk i=0…6 ist ein eigenes kartesisches Koordinatensystem (X_i, Y_i, Z_i) zugeordnet
- Die Z-Achse (Z_i) entspricht gemäß DH-Konvention jeweils der Rotationsachse des i-ten Gelenks
- Die X-Achse (X_i) liegt entlang der gemeinsamen Normalen zwischen zwei aufeinanderfolgenden Z-Achsen
- Die Y-Achse (Y_i) ergibt sich nach der Rechte-Hand-Regel

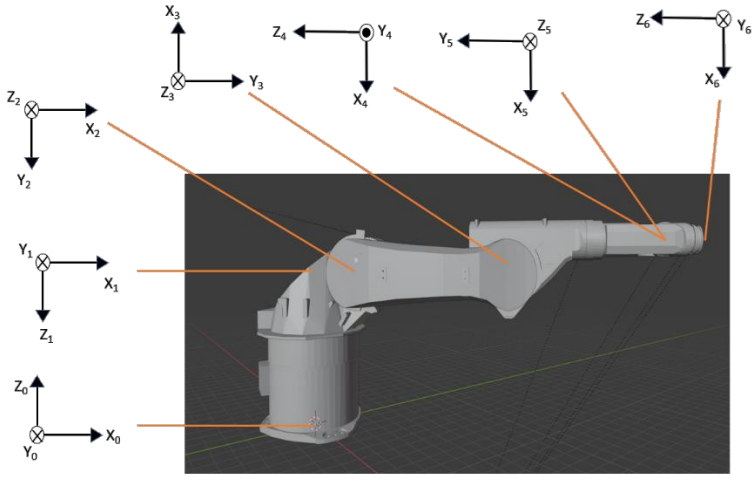


Abbildung 19 Gelenkrahmen für die Berechnung der DH-Parameter

Implementierung der Roboterkinematik in Python

Dieser Abschnitt des Berichts beschreibt die Implementierung des R obotermodells in Python mithilfe der Pybotics-Bibliothek. Für die Modellgenerierung wurden die in Tabelle 3 definierten modifizierten Denavit-

Hartenberg-Parameter (DH-Parameter) verwendet. Die Funktion ***KR60()*** definiert die DH-Parameter des Roboters in Form einer 6×4-Matrix:

- Jede Zeile entspricht einem Gelenk i=1…6
- Die Spalten enthalten die Parameter α_i, a_i, θ_i und d_i.

Diese Parametrisierung wird zur Initialisierung des Robotermodells in Pybotics verwendet.

```
def KR60() -> np.ndarray:
    """Get KR60 model."""
    return np.array(
        [
            [np.pi,0, 0, -815],
            [np.pi / 2, 350, 0, 0],
            [0, 850, -np.pi / 2, 0],
            [np.pi / 2,145,np.pi,-820],
            [np.pi / 2, 0,0, 0],
            [-np.pi / 2, 0,0, -170],
        ]
    )

Pose = robot.fk(joints)
Solv
```

Abbildung 20 Code-Snippet

Vorwärtskinematik

Die Vorwärtskinematik wird mit folgender Funktion berechnet:

```
Pose = robot.fk(joints)
```

Dabei stellt `joints` den Gelenkwinkelvektor $q = [\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6]T$ dar. Die Funktion liefert die homogene Transformationsmatrix $^0\mathbf{T}_6$, welche Position und Orientierung des Tool Center Points (TCS) relativ zum Basiskoordinatensystem (RCS) beschreibt.

Inverskinematik und Modellverifikation

Zur Berechnung der Inverskinematik wird die entsprechende Pybotics-Funktion verwendet, welche zu einer gegebenen TCP-Pose die zugehörigen Gelenkwinkel bestimmt. Die Validierung des implementierten Modells erfolgt durch:

- Berechnung einer Pose mittels Vorwärtskinematik
- Bestimmung der Gelenkwinkel über Inverskinematik
- Erneute Vorwärtskinematik mit den berechneten Winkeln
- Vergleich der resultierenden Transformationsmatrix mit der ursprünglichen Pose

Visualisierung in Blender

In einem weiteren Schritt wurde ein Robotermodell in Blender definiert, indem ein CAD-Modell des Roboters (STL-Datei) importiert wurde. Auch dieses Modell wurde mithilfe derselben Messdaten des realen Roboters am Fraunhofer IAPT validiert. Zur Erstellung der Simulationsumgebung wurden zusätzlich CAD-Modelle weiterer realer Komponenten, wie beispielsweise eines Dreh-Kipptisches und des 3D-Druckkopfes, in die

Blender-Software importiert. Da das Robotermodell in Blender gegenüber dem in Python definierten Modell unterschiedliche Anfangsstellungen sowie abweichende Gelenkkoordinatensysteme aufweist, wurden entsprechende Korrekturen im Hauptprogramm vorgenommen, um konsistente und korrekte Simulationsergebnisse zu gewährleisten. Das kinematische Modell des Roboters bietet eine virtuelle Darstellung des realen Roboters, der während des Auftragsverfahrens verwendet wird. Das nach dem Slicing entwickelte Roboterprogramm kann als Eingabe für dieses Robotermodell verwendet werden, um Positions-, Geschwindigkeits- und Beschleunigungsprofile zu quantifizieren. Für die Visualisierung der Roboterbewegung wurde das Softwarepaket Blender verwendet. Die Ergebnisse der Visualisierung sind in Abbildung 21 dargestellt.

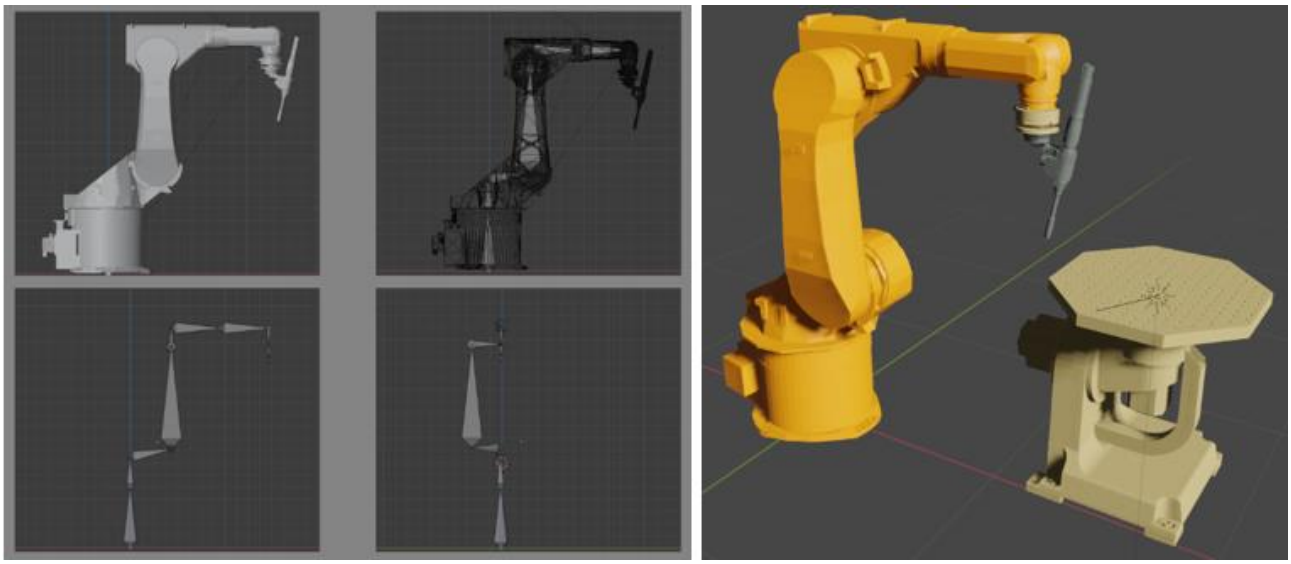


Abbildung 21 Visualisierung des Robotermodells in der Blender-Software und Verknüpfung mit dem Python-Modell

Pulverkonzentrationsmodell

Das teil Modul zur Modellierung des Pulverstroms in der Pulverdüse umfasst die Berechnung von Partikelbahnen, wobei Eigenschaften wie Geschwindigkeitsfelder und Partikelinteraktionen berücksichtigt werden. Die pulverdüse fokussiert das Pulver auf einen Abstand von 16 mm über dem Substrat, wobei eine Streuung von 1 mm um den Fokus eingestellt wird. Die in Abbildung 22 gezeigten Pulvereinlässe definieren auch die Einlasszeiten und -mengen der Partikel, wodurch sich der Pulvermassenstrom ergibt. Der Pulvermassenstrom errechnet sich aus der Dichte des Pulvers ρ_{Pulver}, der Anzahl der pro Freigabezeitpunkt von allen Einlässen gemeinsam freigegebenen Partikel n_{Pulver}, der Frequenz der Freigabezeitpunkte $f_{Einlass}$ und dem Volumen eines einzelnen Partikels:

$$\dot{m}_{Pulver} = \rho_{Pulver} \cdot n_{Pulver} \cdot f_{Einlass} \cdot \left(\frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r_{Partikel}^{3}\right)$$

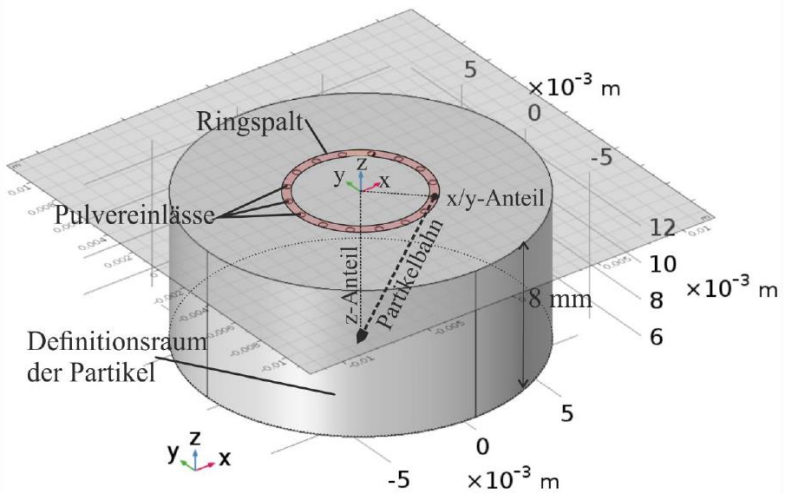


Abbildung 22 Definitionsraum der Pulverpartikel mit Ringspalt und Partikelbahnrichtung

Abschließend wurde im Rahmen dieses Arbeitspakets ein semi-empirisches Modell zur Vorhersage der Schweißnahtgeometrie in Abhängigkeit von Zeit und Ortsauflösung entwickelt. Hierzu wurden drei analytische Teilmodelle – ein Pulverkonzentrationsmodell, ein Prozessmodell auf Basis von Massen- und Energiebilanzen sowie ein roboterspezifisches kinematisches Modell zur Abbildung des realen Geschwindigkeitsprofils ausgearbeitet und miteinander verknüpft.

2.4 Arbeitspaket 4: Entwicklung eines Dexel-basierten Geometriesimulationsmodell für Materialauftrag und Materialabtrag

Im Rahmen von Arbeitspaket 4 wurde eine interaktive Simulationsumgebung zur Abbildung von DED-Prozessen entwickelt. Ziel dieses Arbeitspakets war der Aufbau einer echtzeitfähigen, dexel-basierten und GPU-beschleunigten Auftragssimulation zur geometrischen Modellierung des Materialauftrags während des additiven Fertigungsprozesses.

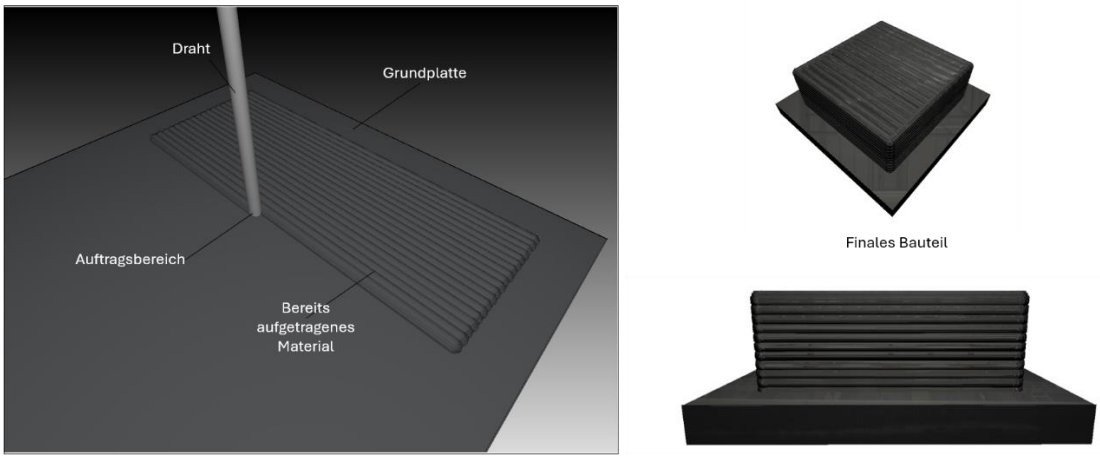


Abbildung 23: Exemplarische Ergebnisse der erarbeiteten GPU-gestützten Auftragssimulation

Als Ausgangspunkt für die Entwicklung diente eine bestehende Materialabtragssimulation, die in den vorhergehenden Forschungsprojekten entwickelt wurde. Diese bestehende Simulationsumgebung wurde im Rahmen des Projekts um Funktionen zur geometrischen Materialaddition erweitert. Hierzu wurden insbesondere

boolesche Operationen mit konvexen Körpern implementiert. Einen Eindruck von der entstandenen Simulation vermittelt Abbildung 23.

Die Simulation kann vollständig auf einer GPU ausgeführt werden Die Geometrien, die in jedem Simulationsschritt aufgetragen werden können, müssen konvex sein und reichen von Kugeln über Ellipsoiden bis hin zu Zylindern. Die Simulation operiert hierbei wahlweise auf Grundlage von CAM-Bahnen sowie eines hieraus generierten NC-Programms. Zur Simulation werden hieraus zeitlich getaktete Zwischenpositionen berechnet, die in jedem Simulationsschritt sukzessiv zur Positionierung der hinzuzufügenden Geometrie genutzt werden.

Neben der reinen geometrischen Simulation des Materialauftrags wurde das Werkstückmodell zudem derart erweitert, dass zusätzliche Kenngrößen an den Enden der einzelnen Dexel gespeichert werden können. Diese Funktionalität ermöglicht es, prozessrelevante Größen direkt auf der Bauteiloberfläche abzulegen. Eine exemplarische Ergebnisdarstellung zeigt Abbildung 24.

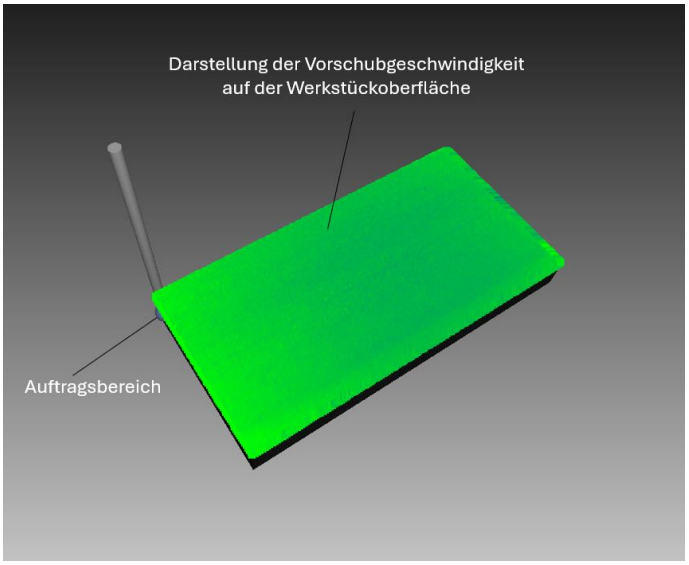


Abbildung 24: Visualisierung von Prozesskenngrößen auf der Werkstückoberfläche

Weiterhin lassen sich so Referenzen zum aktuellen Simulationsschritt sowie zum ausgeführten ablegen, um eine Beziehung zu Bauteilbereich, Prozesskenngrößen und relevanten Bahnbereichen herzustellen. Diese Daten bilden die Grundlage für weiterführende Simulationen und Analysen, die parallel zur geometrischen Dexel-Modellierung durchgeführt werden und im Rahmen von Arbeitspaket 6 weiterverarbeitet werden.

Abschließend wurde eine systematische Evaluierung des Speicher- und Rechenbedarfs der entwickelten Simulation durchgeführt. Dabei wurde untersucht, wie sich unterschiedliche Simulationsauflösungen und Genauigkeitsanforderungen auf die Performance des Systems auswirken. Die Ergebnisse zeigen, dass der entwickelte Ansatz grundsätzlich geeignet ist, eine grafisch-interaktive Simulation des Materialauftragsprozesses zu ermöglichen und damit eine praxisnahe Analyse von DED-Prozessen im virtuellen Umfeld zu unterstützen.

2.5 Arbeitspaket 5: Entwicklung des Geometriemodells und Ableitung von zeit- und ortsabhängigen Dimensionen des virtuellen Werkzeugs (3D-Schmelzbad)

Im Arbeitspaket 3 wurden Teilmodelle auf Basis mathematischer und physikalischer Zusammenhänge entwickelt, die die Grundlage für die Geometrievorhersage bilden. Die Prozessmodelle werden durch ein semi-

empirisches Modell ergänzt, das aus experimentell erhobenen Datensätzen abgeleitet wurde und somit system- und materialspezifische Prozessbedingungen berücksichtigt. Der Schwerpunkt dieses Arbeitspakets lag auf der Entwicklung eines Regressionsmodells zur Vorhersage von Schweißnahthöhe und -breite.

Sensorentwicklung für Geometrieerfassung

Für die Entwicklung der semiempirischen Teilmodelle wurden verschiedene Versuche mithilfe eines DOE-Versuchsplans durchgeführt. Um die Versuchsergebnisse für die Modellentwicklung nutzen zu können, muss nach jedem Versuch die Schweißnahtgeometrie ermittelt werden, da diese durch die Teilmodelle simulativ approximiert werden soll. Dies resultiert in einem enormen Zeitaufwand. Um diesen Aufwand zu verringern wurde im Projekt mit der Entwicklung eines richtungsunabhängigen Sensors begonnen, der die Auftragshöhe und damit die Schweißnahthöhe ermitteln soll. Durch diesen Sensor in Kombination mit einer bereits vorhanden On-Axis CMOS-Kamera wurde das System ermöglicht, während dem Prozess die notwendigen Prozessgrößen aufzunehmen, welche für die Erstellung der Teilmodelle erforderlich sind. Auf diese Weise sollen sich die Teilmodelle sukzessive während dem Projektvorhaben verbessern. Ein Prototypmodell des Sensors ist in die Abbildung 25 dargestellt:

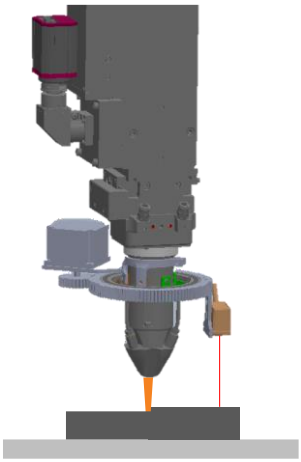


Abbildung 25 Richtungsunabhängiger laserbasierte Sensor gekoppelt mit Bearbeitungskopf

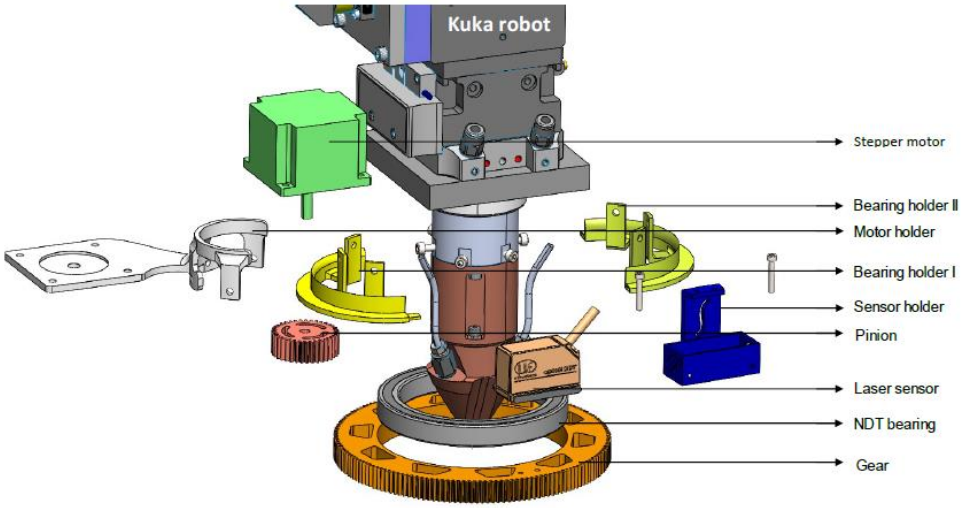


Abbildung 26 Explosionszeichnung des entwickelten Sensorsystems

Abbildung 26 zeigt einen Explosionszeichnung des entwickelten Sensorsystems. Der Drehmechanismus besteht aus zwei Lagerhaltern, die am Endeffektor des KUKA-Roboterarms befestigt sind. Diese Halter stützen das Lager und ermöglichen eine kontinuierliche Drehung. Das Lager sorgt dafür, dass sich der Lasersensor ohne reibungsbedingte Störungen oder Positionsabweichungen um die Auftragsdüse bewegen kann. Der Motorhalter, der mit dem Lagerhalter am KUKA Roboter befestigt ist, nimmt den Schrittmotor auf, der das Rotationssystem antreibt. Die Präzision des Schrittmotors ermöglicht die Feinsteuerung der Drehgeschwindigkeit und der Positionsgenauigkeit des Sensors, die für die Einhaltung der Ausrichtung auf die Auftragsgeometrie entscheidend ist.

Diese Teile sind so zusammengebaut, dass sie zusammen mit dem KUKA-Roboter arbeiten, wobei ein Raspberry Pi (fungiert als Mikroprozessor) für die Echtzeit-Sensorsteuerung sowie ein Motortreiber für die Ansteuerung des Schrittmotors verwendet werden. Der Aufbau ist in Abbildung 26 dargestellt. Diese Integration ermöglicht eine präzise Steuerung der Bewegung des Sensors in Bezug auf den Auftragsprozess und damit eine kontinuierliche Datenerfassung während des gesamten Schicht-für-Schicht-Herstellungsprozesses. Abbildung 27 zeigt die Befestigung des Mikroprozessors, des Schrittmotortreibers und des Sensorsignalwandlers am Roboter.

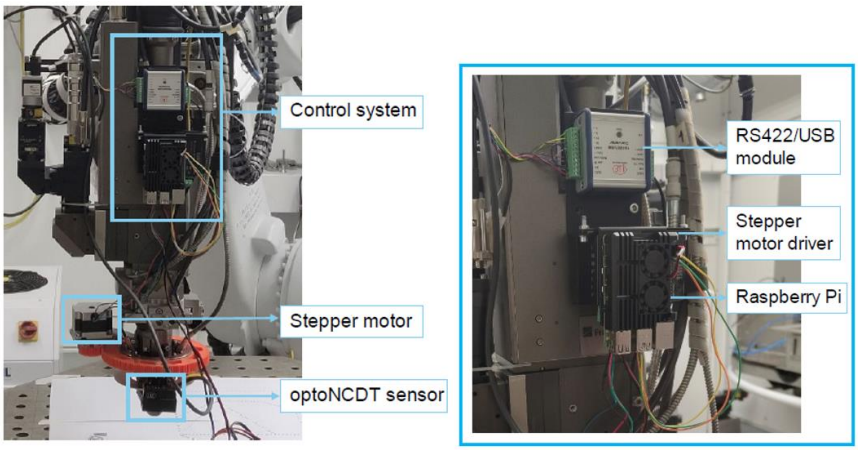


Abbildung 27 Sensorsystem am DED-Kopf des Kuka 6-Achsen-Industrieroboters (Links); Am Roboterkopf montierter Mikroprozessor, der für die Funktion der Sensoren erforderlich ist (Rechts)

Visualisierung der Datensätze mit OpenARMS

Die BCT-Software OpenARMS wurde mit modul openDED und OpenScan benutzt, welche die synchrone Ablage sämtlicher Prozessdaten wie Roboterpositionen, Temperaturmessungen, laserparameter und Geometriedaten des Laser-Triangulationssensors ermöglicht hat. Alle Messwerte werden mit Zeitstempel in einer Datenbank gespeichert. Innerhalb von OpenARMS lassen sich diese Daten einsehen (siehe Abbildung 28).

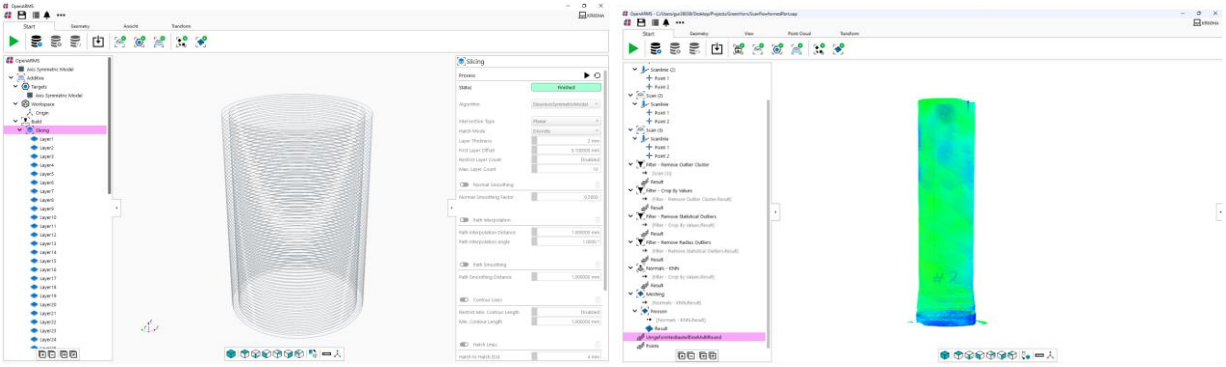


Abbildung 28 Visualisierung des Werkzeugpfads vor der Fertigung (links); sowie Visualisierung der erfassten Sensordatenpunkte nach der Fertigung (rechts) mit OpenARMS

Durchführung von DOE mit primären Prozessparametern für die Entwicklung von Regressionsmodellen

Zur Bestimmung des Zusammenhangs zwischen den Prozessparametern und der resultierenden Schweißnahtgeometrie wurde ein multiples polynomiales Regressionsmodell eingesetzt. Die abhängigen Zielgrößen sind die Höhe und Breite der Schweißnaht, während Laserleistung, Prozessgeschwindigkeit und Pulvermassenstrom als unabhängige Variablen in das Modell eingehen. Die Regression basiert auf den in Anhang dargestellten Datensätzen. Ziel des Regressionsmodells ist es, diese Trends mathematisch nachzubilden, sodass für jedes Ellipsoid eine nicht-konstante Querschnittsgeometrie in Abhängigkeit der zugeordneten Prozessparameter bestimmt werden kann. Dadurch erhält das Gesamtmodell eine realistischere Abbildung des physikalischen Prozesses.

Während lineare Regressionen häufig zur Beschreibung von Zusammenhängen verwendet werden, war hier aufgrund der nichtlinearen Abhängigkeiten die Verwendung höherer Polynomgrade erforderlich. Die Wahl des Polynomgrades erfolgte anhand des Vergleichs zwischen Vorhersage und experimentellen Ergebnissen sowie der Analyse des mittleren quadratischen Fehlers. Polynome vierter Ordnung und höher führten zu Überanpassung (Overfitting), während ein Polynom dritter Ordnung noch signifikante Fehler aufwies. Daher wurde ein Regressionsmodell zweiter Ordnung als geeignet identifiziert. Die primären Prozessparameter, die für die Experimente verwendet wurden, sind in der Tabelle 4 aufgeführt.

Tabelle 4 Ausgewählte Prozessparametersätze mit primären Prozessparametern

Prozessparameter	Unit	Prozessparameter Set		
		1	2	3
Laser power, $\boldsymbol{P_l}$	W	1450	700	1500
Deposition speed, $\boldsymbol{U}$	m/s	0.01	0.01	0.0267
Powder mass flow rate, $\dot{\boldsymbol{m}}$	g/min	13.10	6.00	16.10

Der Zusammenhang zwischen den Prozessvariablen und der Nahtgeometrie lässt sich wie folgt beschreiben:

$$\boldsymbol{y} = \boldsymbol{b}_0 + \boldsymbol{b}_1\boldsymbol{x}_1 + \boldsymbol{b}_2\boldsymbol{x}_2 + \ldots + \boldsymbol{b}_{n-1}\boldsymbol{x}_{n-1} + \boldsymbol{b}_n\boldsymbol{x}_n + \boldsymbol{b}_{n+1}\boldsymbol{x}_1^{\,2} + \boldsymbol{b}_{n+2}\boldsymbol{x}_1\boldsymbol{x}_2 + \ldots + \boldsymbol{b}_{n+m}\boldsymbol{x}_m^{\,2}$$

- y: Abhängige Variablen, die vorhergesagt werden sollen (Höhe und Breite der Schweißnaht)
- $x_1, x_2, \ldots, x_{(n-1)}$: Unabhängige Variablen (Laserleistung, Massenstrom und Auftragsgeschwindigkeit)
- $x_{(n)}, x_{(n+1)}, \ldots, x_{(n+m)}$: Polynomiale Terme der unabhängigen Variablen

- $b_0, b_1, b_2, \ldots, b_{(n+m)}$: Regressionskoeffizienten

$$Nahthöhe = -209.95 + 1.19 * \boldsymbol{P_l} - 0.02 * \boldsymbol{U} - 0.0054 * \dot{\boldsymbol{m}}$$
$$-0.00062 * \boldsymbol{P_l}^2 - 32.24 * \boldsymbol{U}^2 + 0.25 * \dot{\boldsymbol{m}}^2$$
$$+442220.55 * \boldsymbol{P_l}^2 * \boldsymbol{U}^2$$
$$-0.15 * \boldsymbol{U}^2 * \dot{\boldsymbol{m}}^2 - 22.90 * \boldsymbol{P_l} * \dot{\boldsymbol{m}}$$

$$Nahtbreite = 4467.33 - 2.94 * \boldsymbol{P_l} - 0.016 * \boldsymbol{U} + 0.014 * \dot{\boldsymbol{m}}$$
$$+0.00073 * \boldsymbol{P_l}^2 - 24.78 * \boldsymbol{U}^2 + 0.32 * \dot{\boldsymbol{m}}^2 +$$
$$318482.91 * \boldsymbol{P_l}^2 * \boldsymbol{U}^2$$
$$-0.11 * \boldsymbol{U}^2 * \dot{\boldsymbol{m}}^2 - 35.63 * \boldsymbol{P_l} * \dot{\boldsymbol{m}}$$

In den folgenden Abbildungen (Abbildung 29 und Abbildung 30) sind beispielhaft zwei Modelle dargestellt, die zeigen wie die Nahthöhe- und Breite von der Laserleistung und Auftragsgeschwindigkeit abhängen. In diesem Fall wurde der Pulver-Massen-Strom konstant gehalten.

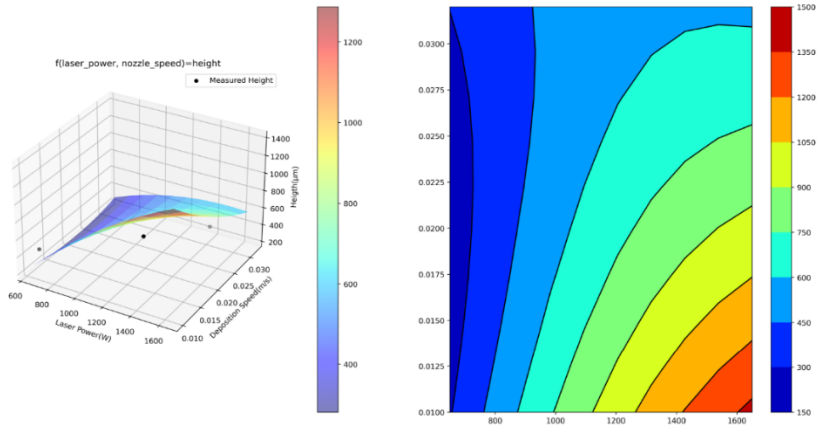


Abbildung 29 Nahthöhe in Abhängigkeit von Laserleistung und Auftragsgeschwindigkeit

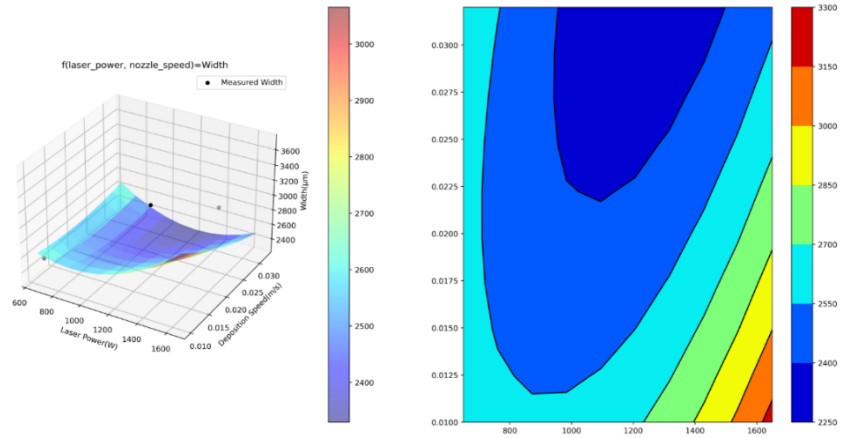


Abbildung 30 Nahtbreite in Abhängigkeit von Laserleistung und Auftragsgeschwindigkeit

Zur Erhöhung der Modellgenauigkeit wurden in diese Arbeitspaket ergänzend experimentelle Untersuchungen im Rahmen einer DOE-Studie durchgeführt und Regressionsmodelle zur Korrektur der analytischen

Ansätze entwickelt. Als Bewertungsgrößen dienten die geometrischen Kenngrößen der Schweißnaht (Höhe, Breite und Aspektverhältnis). Diese Ergebnisse dienen als Input für AP3 sowie AP6.

2.6 Arbeitspaket 6: Erweiterung des Dexel-basierten Geometriesimulationsmodell mit Ablage und Abrufen von charakteristischen Kerngrößen

Im Arbeitspaket 6 wurde das in Arbeitspaket 4 entwickelte Dexel-basierte Simulationsframework mit dem in Arbeitspaket 5 entwickelten Geometriemodell gekoppelt. Ziel dieser Kopplung war die Durchführung einer Werkzeugbahnbasierten Auftragssimulation, zunächst für einzelne Schichten und anschließend für das gesamte Bauteil. Hierzu wurde eine Simulationsumgebung entwickelt und implementiert, die eine zeit- und positionsabhängige Dexel-basierte Simulation des Materialauftrags ermöglicht. In dieser Umgebung wird der Materialauftrag entlang der generierten Werkzeugbahnen schrittweise simuliert, sodass der schichtweise Aufbau der Bauteilgeometrie im virtuellen Modell abgebildet werden kann.

Darüber hinaus wurde eine geeignete Datenbankstruktur entwickelt, die die Speicherung und den Abruf relevanter Prozessinformationen ermöglicht. Zu den gespeicherten Daten gehören unter anderem die Layer-Nummer, die verwendeten Prozessparameter, Temperaturinformationen sowie geometrische Kenngrößen wie die resultierende Schichthöhe einzelner Dexel. Diese Informationen können für nachgelagerte Analysen sowie für die Bewertung der Prozessstabilität herangezogen werden. Insbesondere relevant waren hier die Ermittlung der lokale Eingriffsbedingungen der aufzutragenden Geometrie und Prozessparameter am bearbeiteten Bauteilbereich.

Zur Ermittlung der relevanten Größen wir der in Abbildung 31 gezeigte Ablauf in jedem Simulationsschritt durchlaufen.

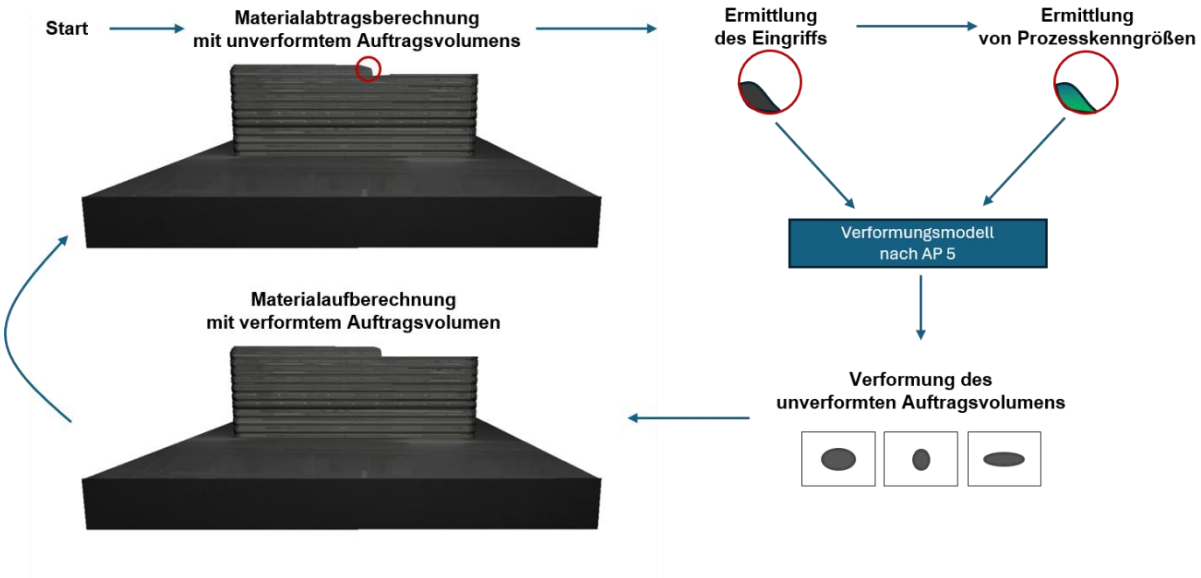


Abbildung 31 Simulationsablauf zu Deformation des Auftragsvolumens

Der Ablauf beginnt mit einer Materialabtragsberechnung mit einem aufzutragenden, unverformten Auftragsvolumen. Hierbei wird jedoch kein tatsächlicher Materialabtrag durchgeführt. Die Berechnung dient lediglich der Ermittlung der aktuellen Eingriffsbedingungen des Volumens sowie der Rückgewinnung von Prozesskenngrößen auf der Bauteiloberfläche. Eingriffsbedingungen und Prozesskenngrößen gehen anschließend in das in AP 5 erarbeitete Regressionsmodell ein und liefern Höhen und Breiten der Nahtgeometrie, mit denen das

ursprüngliche Auftragsvolumen deformiert wird. Das Regressionsmodell wurde dazu um die Verarbeitung der Eingriffsgrößen erweitert. Das angepasste Auftragsvolumen wird anschließend für den Materialauftrag entsprechend AP 2 verwendet.

Die entwickelte Simulationsumgebung wurde anschließend anhand von Demonstratorbauteilen angewendet und untersucht. Dabei wurde insbesondere das Speicher- und Laufzeitverhalten der Simulation in Abhängigkeit von der gewählten Modellauflösung analysiert.

2.7 Arbeitspaket 7: Prozessabbruchkriterien für das Geometrie Modell und Ermittlung der optimalen Prozessstrategie

Die AP7 beginnt mit der Auswahl und Anpassung der primären Prozessparameter. Zu diesen zählen insbesondere die Laserleistung, die Abscheidungsgeschwindigkeit, die Pulvermassenstromrate sowie der Durchmesser des Laserstrahls, wie in Tabelle 4 zusammengestellt sind. Die Optimierung dieser Parameter kann entweder durch ein klassisches vollfaktorielles Design of Experiments (DoE) erfolgen, welches jedoch mit einem hohen Zeit- und Ressourcenaufwand verbunden ist, oder durch den Einsatz moderner mehrzieliger Optimierungsalgorithmen wie dem NSGA-II-Algorithmus (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm). Durch den Einsatz von Pareto-Optimierungstechniken lässt sich die Anzahl der notwendigen Experimente deutlich reduzieren. Dadurch können sowohl der experimentelle Aufwand als auch der Ressourcenverbrauch erheblich verringert werden. Im Rahmen vorheriger Untersuchungen wurde bereits eine umfassende Prozessparameteroptimierung mithilfe der NSGA-II-Methodik durchgeführt [36,37]. Ziel dieser Untersuchungen war die gleichzeitige Optimierung mehrerer Qualitätsmerkmale des Prozesses. Die betrachteten Zielgrößen umfassten unter anderem das Aspektverhältnis der Geometrie der Schweißraupe, die Qualität der Bindung zwischen aufgetragenem Material und Grundplatte, bewertet durch visuelle Inspektion und Kontaktwinkelmessung, sowie die Ausbildung rissfreier und spritzerfreier Schweißraupen.

Auf Grundlage der erzielten Ergebnisse wurden drei geeignete Parametersätze identifiziert und für weiterführende Analysen ausgewählt. Diese Parametersätze sind in Tabelle 5 zusammengefasst.

Tabelle 5 Die drei ausgewählte Prozess Parametersätze

Parameter	Unit	Process parameter set		
		1	2	3
Laser power	W	1450	700	1500
Deposition speed	m/s	0.01	0.01	0.0267
Powder mass flow rate	g/min	13.10	6.00	16.10
Intensity	W/mm^2	424.27	396.11	437.28
Energy per unit length	kJ/m	145.00	70.00	56.25
Laser ramp up	ms	10	10	10
Laser ramp down	ms	60	60	60
Weld velocity	m/s	0.01	0.01	0.0267
Non-weld velocity	m/s	0.04	0.04	0.04
Disk rotation	rpm	5.7	2.7	7
Beam diameter	mm	2.09	1.50	2.09
Z-shift	mm	17	12	17
Carrier gas flowrate (He)	lpm	4	2.7	5
Shielding gas flowrate (Ar)	lpm	20	20	20

Powder pre-flow rate	s	22	22	22
Powder post-flow rate	s	5	5	5
Dwell time	s	5	5	5

Die ausgewählten Prozessparametersätze werden anschließend mit zwei unterschiedlichen Werkzeugbahnstrategien kombiniert, nämlich parallelen und Zickzack-Werkzeugbahnen. Diese beiden Strategien repräsentieren zwei Extremfälle hinsichtlich der auftretenden Abkühlraten während des Auftragsprozesses. Für zwei räumlich benachbarte Punkte in benachbarten unterscheidet sich der zeitliche Abstand zwischen den einzelnen Depositionsereignissen deutlich. Bei der parallelen Werkzeugbahn ist dieser zeitliche Abstand wesentlich größer als bei der Zickzack-Werkzeugbahn. Diese unterschiedlichen zeitlichen Abstände beeinflussen die Schmelzbad-Dynamik, die Abkühl- und Erstarrungsrate sowie die daraus resultierenden geometrischen Abmessungen der aufgetragenen Strukturen. Folglich können sich zwischen der parallelen und der Zickzack-Werkzeugbahnstrategie deutliche Unterschiede im Prozessverhalten und in der resultierenden Bauteilgeometrie ergeben.

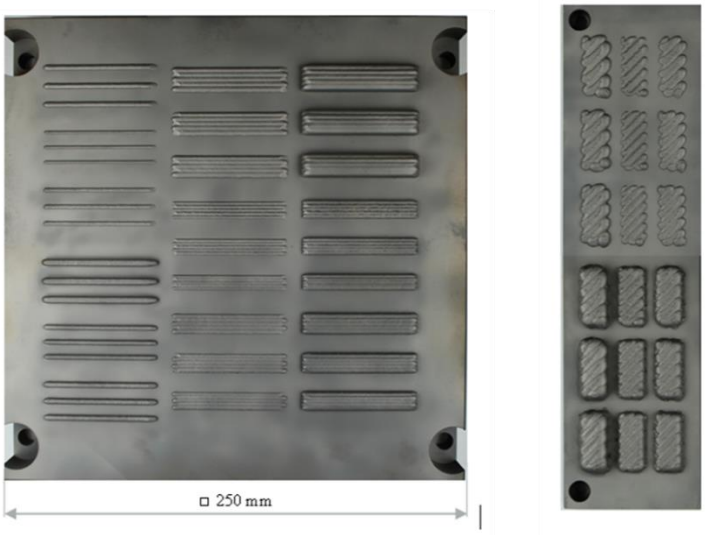


Abbildung 32 Experimentelle Test Geometrien zur Analyse des Schmelzbads und der resultierenden Geometrie für zwei Werkzeugbahnstrategien: parallele Strategie (links) und Zickzack-Strategie (rechts).

Die Abbildung 33 zeigt die verschiedenen geometrischen Messgrößen, die für Einzelraupen-, Wand- und Blockgeometrien quantifiziert werden. Die Untersuchung der Querschliffe der Mikrographien beginnt mit den Einzelraupengeometrien, um die Raupenhöhe h, die Raupenbreite b sowie das daraus resultierende Aspektverhältnis f zu bestimmen. Darüber hinaus zeigt Abbildung 34 die geätzten Proben, anhand derer die Schweißraupentiefe d_w gemessen wird. Auf Grundlage dieser Messung wird anschließend die ‚layer dilution' d_l ermittelt. Auf Grundlage dieser experimentellen Ergebnisse sowie der geometrischen Charakterisierung wurden optimale Prozessparameter sowie geeignete Slicing- und Werkzeugbahnstrategien bestimmt und anschließend validiert.

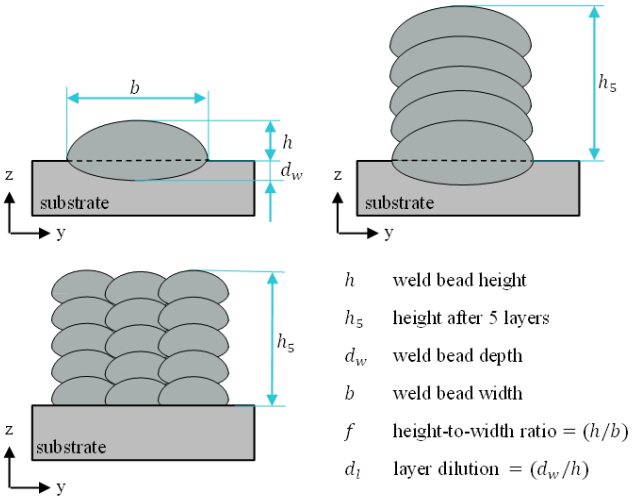


Abbildung 33 Charakteristische Merkmale der Schweißgeometrie

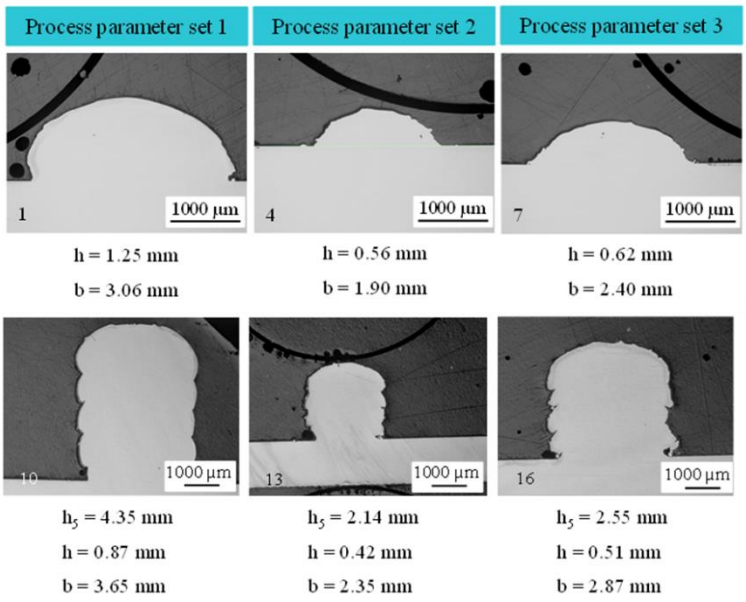


Abbildung 34 Geometrische Messgrößen aus Querschliffmikrographien

2.8 Arbeitspaket 8: Validierung des Geometriemodells

Im Arbeitspaket 8 wurden Validierungsschweißversuche durchgeführt und anschließend geometrisch charakterisiert. Die geometrische Charakterisierung erfolgte dabei nicht über den am Druckkopf montierten Sensor, sondern mithilfe einer Koordinatenmessmaschine (CMM), um nach dem Druckprozess eine deutlich präzisere Datenerfassung zu ermöglichen. Für die Validierungsversuche wurden einfache Geometrien wie Kreis-, Quadrat- und Kreuzstrukturen gefertigt. Dabei kamen drei unterschiedliche Prozessparametersätze zum Einsatz, die in den vorherigen Arbeitspaketen definiert wurden. Abbildung 35 zeigt die Ergebnisse der gefertigten Strukturen. Die geometrische Charakterisierung erfolgte mittels CMM-Messungen, wobei die resultierenden Geometriedaten in Form einer Punktwolke erfasst wurden. Abbildung 36 stellt die entsprechende geometrische Auswertung anhand der erzeugten Punktwolken dar.

Abbildung 35 Directed Energy Deposition von Test Geometrien

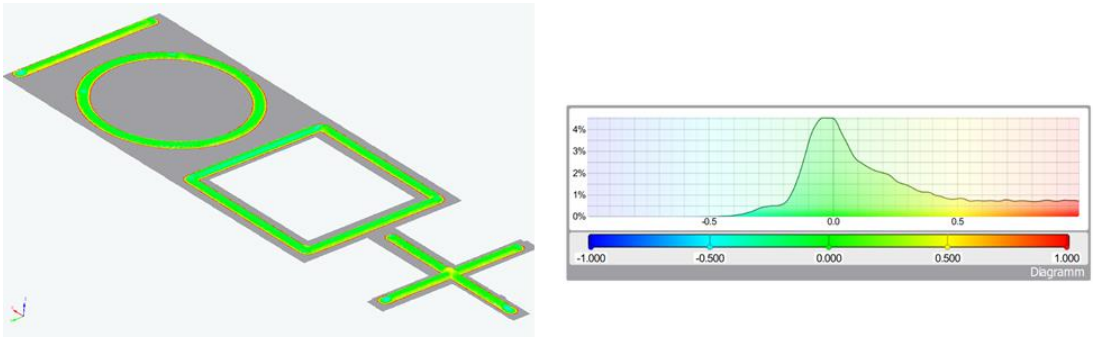


Abbildung 36 Geometrische Charakterisierung der Test Geometrien mittels KMM als punkt Wolke (links) und Histogramm (rechts)

Darüber hinaus wurden weitere Geometrien unter Verwendung zweier unterschiedlicher Werkzeugbahnstrategien, nämlich parallel und Zickzack, gefertigt und geometrisch charakterisiert. Ziel dieser Untersuchungen war ein Vergleich der experimentell ermittelten Geometriedaten mit den Ergebnissen des Dexel-Modells. Abbildung 37 zeigt die gefertigten Test Geometrien sowie die entsprechende geometrische Charakterisierung. Abbildung 38 zeigt die Simulationsergebnisse basieren auf dem im Projekt entwickelten Dexel-basierten Geometriemodell. Zur experimentellen Überprüfung wurde die entsprechende Demonstratorgeometrie mittels DED-Verfahren aus der Titanlegierung Ti-6Al-4V hergestellt. Dadurch konnte ein direkter Vergleich zwischen Simulation und realem Fertigungsergebnis durchgeführt werden.

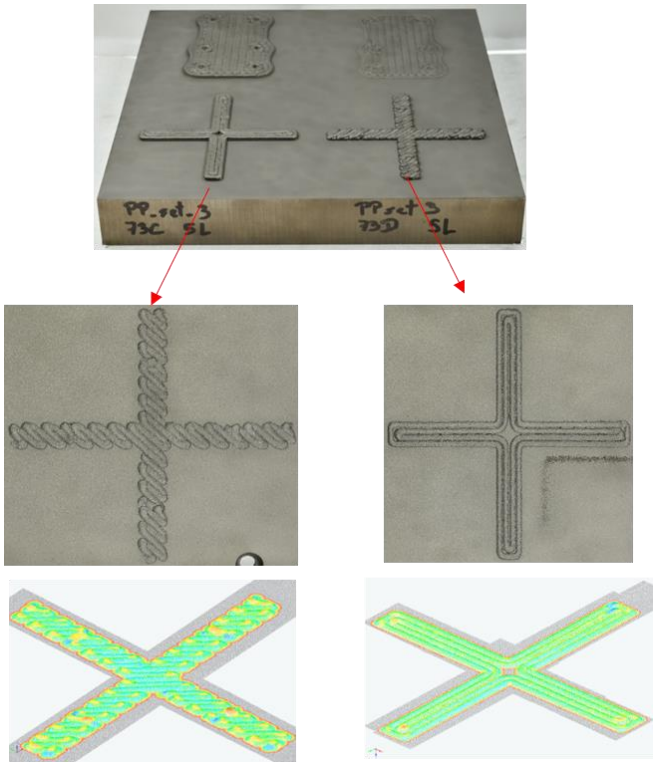


Abbildung 37 Gefertigte Test Geometrien mit zwei Werkzeugbahnstrategien sowie deren geometrische Charakterisierung

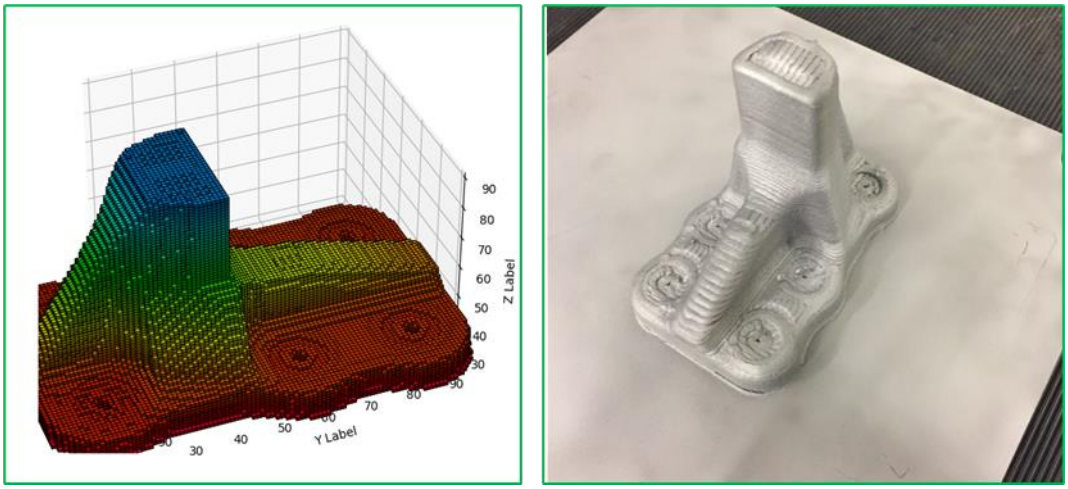


Abbildung 38 Ergebnisse der Simulation mit dem entwickelten Dexel-Modell (links); mittels DED gefertigte Demonstrator Geometrie aus Ti-6Al-4V (rechts)

3 Verwendung der Zuwendung

Für die beschriebenen wissenschaftlichen Tätigkeiten wurden die in Tabelle 4 aufgeführten Personalaufwände für wissenschaftlich-technisches Personal der Stufe HPA-A und HPA-B benötigt.

Tabelle 4: Personaleinsatz

Forschungseinrichtung	Personal	Personenmonate
FVP	Wissenschaftlicher Angestellter HPA-A	12,00 PM
FVP	Technischer Angestellter HPA-B	12,00 PM
IAPT	Wissenschaftlicher Angestellter HPA-A	24,00 PM

Die im Rahmen des Projektes beschäftigten Techniker und studentischen Hilfskräfte waren mit projektbegleitenden Versuchsdurchführungen sowie Recherche-, Dokumentations- und einfachen Implementierungsaufgaben betraut. Die Ausgaben für die Beschäftigung der Stufen HPA-C und HPA-F lassen sich dem beiliegenden zahlenmäßigen Nachweis (bZ) entnehmen.

Gerätebeschaffungen wurden keine vorgenommen.

4 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die im Projekt durchgeführten Arbeiten waren erforderlich, um die im Projekt definierten Ziele zu erreichen. Die einzelnen Arbeitsschritte wurden entsprechend dem Arbeitsplan umgesetzt und dienten der systematischen Entwicklung und Validierung der im Projekt vorgesehenen Modelle. Umfang und Vorgehensweise der Arbeiten sind daher als angemessen zu bewerten.

In Arbeitspaket 3 wurden mehrere Teilmodelle entwickelt, die als Grundlage für ein geometrisches Modell zur Vorhersage der Schweißnahtabmessungen im DED-Prozess dienen. Zur Validierung des in diesem Arbeitspaket entwickelten DED-Prozessmodells wurden Fertigungsversuche mit der robotergestützten Laserauftragsschweißanlage durchgeführt. Die hergestellten Probekörper wurden anschließend geometrisch charakterisiert. Hierfür kamen metallographische Untersuchungen sowie Messungen mittels Koordinatenmessmaschine zum Einsatz. Diese Charakterisierungsschritte stellen jedoch aufwendige Nachbearbeitungsprozesse dar und sind mit einem erheblichen zeitlichen Aufwand verbunden. Zur systematischen Untersuchung der Prozessparameter wurde zunächst ein DOE-basierter experimenteller Ansatz gewählt. Das daraus resultierende Regressionsmodell erwies sich jedoch als nicht ausreichend genau, um das DED-Prozessmodell zuverlässig abzubilden; es traten Abweichungen von bis zu 48 % auf. Die Anzahl der durchgeführten Experimente war somit nicht ausreichend, um das Prozessverhalten hinreichend präzise zu modellieren. Eine Erhöhung der Anzahl der Versuche zur Verbesserung der Modellgenauigkeit hätte gleichzeitig einen deutlich erhöhten Aufwand für die geometrische Charakterisierung der Proben zur Folge. Darüber hinaus lassen sich mit dem bisherigen Ansatz keine schichtweisen Informationen erfassen, sofern keine Messungen zwischen einzelnen Schichten durchgeführt werden, was den experimentellen Aufwand weiter erheblich erhöhen würde.

Vor diesem Hintergrund wurde eine alternative Lösung entwickelt. Diese basiert auf dem Einsatz eines direkt am Druckkopf integrierten Lasertriangulationssensors, der die Schichthöhe während des Fertigungsprozesses erfasst. Da der verwendete Sensor unidirektional arbeitet, der Prozess selbst jedoch richtungsunabhängig erfolgt, wurde im Rahmen des Projekts ein bewegliches (rotierendes) Sensorkonzept entwickelt. Das entwickelte Sensorkonzept ist richtungsunabhängig einsetzbar und kann direkt am Auftragskopf montiert werden. Dadurch wird eine kontinuierliche geometrische Charakterisierung während des Fertigungsprozesses (Online-Messung) ermöglicht (weitere Infos in Kapitel 2.5). Die Entwicklung dieses Sensorkonzepts war im ursprünglichen Arbeitsplan nicht vorgesehen, erwies sich jedoch als notwendig, um eine effizientere und präzisere Prozesscharakterisierung zu ermöglichen und damit die Projektziele besser zu erreichen. Die Entwicklung, Integration und experimentelle Erprobung des Sensors sowie die Durchführung zusätzlicher Fertigungsversuche führen zu einer Anpassung des Projektzeitplans. Aus diesem Grund war eine Verlängerung der Projektlaufzeit um **sechs Monate** notwendig.

5 Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU sowie ihres innovativen Beitrags und ihrer industriellen Anwendungsmöglichkeiten

Die im Rahmen des Forschungsvorhabens entwickelten Methoden und Modelle leisten einen wesentlichen Beitrag zur Verbesserung der Prozessplanung und Prozessstabilität bei Directed Energy Deposition (DED)-Verfahren. Ziel des Projektes war die Entwicklung eines Dexel-basierten Geometriesimulationsmodells zur Analyse der Herstellbarkeit und Prozessstabilität großvolumiger additiv gefertigter Strukturen. Durch den entwickelten Ansatz konnte eine alternative Simulationsmethodik entwickelt werden, die eine deutlich geringere rechnerische Komplexität aufweist als klassische FEM-basierte Modelle und gleichzeitig eine realitätsnahe Abbildung der geometrischen Prozessdynamik ermöglicht.

5.1 Wissenschaftlich-technischer Nutzen

Aus wissenschaftlich-technischer Sicht stellt das entwickelte Dexel-basierte Simulationsmodell eine neuartige Methodik zur geometrischen Modellierung von Materialauftragprozessen dar. Während konventionelle FEM-basierte Modelle primär auf die thermomechanische Simulation abzielen und aufgrund ihrer hohen Rechenzeiten meist nur in Forschungsumgebungen oder in Großunternehmen eingesetzt werden können, ermöglicht der im Projekt entwickelte Ansatz eine deutlich schnellere und ressourcenschonendere Simulation des additiven Auftragsprozesses.

Ein wesentlicher wissenschaftlicher Beitrag liegt in der **Kopplung mehrerer Teilmodelle**, bestehend aus Prozessmodell, Pulverkonzentrationsmodell sowie einem roboterspezifischen Kinematik Modell mit einem Dexel-basierten Geometriemodell. Diese Kombination erlaubt erstmals die orts- und zeitabhängige Vorhersage der Schweißraupengeometrie innerhalb einer simulationsbasierten Prozessanalyse. Darüber hinaus ermöglicht die entwickelte Methodik die Ableitung charakteristischer Prozessgrößen wie Schichthöhe, Schweißnahtbreite sowie Arbeitsabstand entlang der Werkzeugbahn.

Durch die Integration dieser Kenngrößen in ein geometrisches Simulationsframework können kritische Prozesszustände frühzeitig erkannt werden. Hierzu wurden spezifische Prozessabbruchkriterien definiert, die beispielsweise Abweichungen der Schichtgeometrie, thermische Überhitzung oder Instabilitäten im Pulverstrom berücksichtigen. Die Simulation ermöglicht somit eine virtuelle Bewertung verschiedener Prozessstrategien und Werkzeugbahnen bereits in der Planungsphase des additiven Fertigungsprozesses. Ein weiterer wissenschaftlicher Beitrag des Projektes liegt in der Entwicklung **semi-empirischer Regressionsmodelle** zur Vorhersage der Schweißnahtgeometrie auf Basis experimenteller Datensätze. Durch die Kombination analytischer Modelle mit experimentell bestimmten Korrekturtermen konnte eine verbesserte Modellgenauigkeit erreicht werden, ohne den Rechenaufwand erheblich zu erhöhen.

Zusammenfassend stellt das entwickelte Simulationsmodell eine neue Methodik zur geometriebasierten Prozesssimulation dar, welche die Lücke zwischen einfachen CAD/CAM-Visualisierungen und hochkomplexen thermomechanischen FEM-Simulationen schließt.

5.2 Wirtschaftlicher Nutzen insbesondere für KMU

Neben dem wissenschaftlichen Erkenntnisgewinn bietet das Projekt insbesondere für kleine und mittlere Unternehmen (KMU) erhebliche wirtschaftliche Vorteile. Der Einsatz additiver Fertigungsverfahren im industriellen Umfeld wird bislang häufig durch hohe Einstiegshürden, fehlendes Prozesswissen sowie kostenintensive Trial-and-Error-Versuche bei der Prozessoptimierung eingeschränkt. Das im Projekt entwickelte Simulationsmodell adressiert genau diese Herausforderungen. Durch die Möglichkeit, unterschiedliche Prozessstrategien **virtuell zu simulieren und zu bewerten**, können aufwendige experimentelle Iterationen deutlich reduziert werden. Dadurch lassen sich sowohl Entwicklungszeiten als auch Kosten für Material, Energie und Maschinenbelegung erheblich senken. Insbesondere bei komplexen Bauteilen oder bei Kleinserienfertigung kann dies einen erheblichen wirtschaftlichen Vorteil darstellen.

Ein weiterer wichtiger Aspekt für KMU ist die reduzierte Abhängigkeit von hochpreisigen Simulationssoftwarelösungen. Klassische FEM-basierte Softwarepakete erfordern häufig hohe Lizenzkosten sowie spezialisiertes Expertenwissen. Das im Projekt entwickelte Modell hingegen ist so konzipiert, dass es in bestehende CAD/CAM-basierte Softwareumgebungen integriert werden kann. Dadurch können KMU ihre bereits vorhandene Softwareinfrastruktur weiterhin nutzen und gleichzeitig von erweiterten Simulationsfunktionen profitieren.

Darüber hinaus unterstützt das entwickelte Simulationsmodell die Realisierung eines sogenannten „**First-Time-Right**“-Fertigungsansatzes. Durch die frühzeitige Bewertung der Prozessstabilität und der Herstellbarkeit eines Bauteils können potenzielle Defekte bereits im Vorfeld identifiziert und geeignete Prozessstrategien ausgewählt werden. Dies erhöht die Prozesssicherheit und reduziert Ausschuss sowie Nachbearbeitungsaufwand. Insgesamt trägt das Projekt damit zur Senkung der technologischen Einstiegshürden in die additive Fertigung bei und stärkt die Wettbewerbsfähigkeit von KMU in diesem schnell wachsenden Technologiefeld.

5.3 Innovativer Beitrag und industrielle Anwendungsmöglichkeiten

Der innovative Beitrag des Projektes liegt insbesondere in der Entwicklung eines **geometriebasierten Simulationsansatzes**, der eine praxisnahe und gleichzeitig effiziente Analyse von DED-Prozessen ermöglicht. Die Kombination aus Dexel-basierter Volumenrepräsentation, semi-empirischer Prozessmodellierung und roboterspezifischer Kinematik stellt eine neuartige Methodik dar, die bislang in dieser Form nicht in kommerziellen Softwarelösungen verfügbar ist.

Die im Projekt entwickelten Modelle und Algorithmen können perspektivisch in verschiedene industrielle Softwarelösungen integriert werden. Insbesondere Anbieter von CAD/CAM-Software oder spezialisierten AM-Planungstools können das Simulationsmodell als Erweiterungsmodul in bestehende Softwareprodukte implementieren. Dadurch lassen sich neue Funktionalitäten zur Prozesssimulation und Prozessoptimierung in der additiven Fertigung bereitstellen.

Auch für industrielle Endanwender ergeben sich vielfältige Anwendungsmöglichkeiten. Das entwickelte Simulationsframework kann beispielsweise zur Planung von Reparaturprozessen, zur Herstellung großvolumiger Strukturbauteile oder zur Optimierung von Werkzeugbahnstrategien eingesetzt werden. Branchen wie Luft- und Raumfahrt, Maschinenbau, Energieanlagenbau oder Schienenfahrzeugtechnik können dabei besonders von der verbesserten Prozessvorhersage profitieren.

Langfristig kann die entwickelte Methodik dazu beitragen, die **Industrialisierung von DED-Verfahren** weiter voranzutreiben. Durch eine bessere Planbarkeit der Prozesse, reduzierte Entwicklungszeiten und eine höhere Prozessstabilität wird die additive Fertigung auch für kleinere Unternehmen wirtschaftlich attraktiver. Damit leistet das Projekt einen wichtigen Beitrag zur technologischen Weiterentwicklung und breiteren industriellen Nutzung additiver Fertigungstechnologien.

6 Wissenstransfer in die Wirtschaft

Der Transfer der im Projekt erzielten Ergebnisse in die industrielle Praxis erfolgte während der gesamten Projektlaufzeit durch eine **enge Zusammenarbeit** zwischen den Forschungseinrichtungen und den im projektbegleitenden Ausschuss (PBA) vertretenen Industriepartnern. Die Unternehmen brachten ihre praktischen Anforderungen und Erfahrungen aus den Bereichen additive Fertigung, sowie CAD/CAM-Softwareentwicklung in das Projekt ein. Dadurch konnte sichergestellt werden, dass die entwickelten Methoden und Modelle gezielt an den Bedürfnissen der industriellen Anwendung ausgerichtet sind.

Es wurden regelmäßig der aktuelle Stand der Forschungsarbeiten, Zwischenergebnisse sowie Demonstratoren vorgestellt und mit den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses einzeln diskutiert. Diese kontinuierliche Abstimmung ermöglichte es den beteiligten Unternehmen, frühzeitig Einblick in die entwickelten Lösungsansätze zu erhalten und deren industrielle Relevanz zu bewerten. Die im Projekt entwickelten Modelle und Methoden zur Dexel-basierten Geometriesimulation von DED-Prozessen bieten insbesondere für kleine und mittlere Unternehmen ein hohes Anwendungspotenzial. Durch die Möglichkeit, Prozessstrategien und Werkzeugbahnen bereits im virtuellen Umfeld zu analysieren und zu optimieren, können experimentelle Iterationen reduziert und Entwicklungszeiten verkürzt werden.

Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, die entwickelten Algorithmen und Simulationsansätze perspektivisch in industrielle Softwarelösungen, insbesondere CAD/CAM-basierte Planungstools (SKM, Module Works und AixPath) für additive Fertigungsprozesse sowie weitere auftragende Prozesse zu integrieren. Auf diese Weise kann eine breite industrielle Nutzung der Projektergebnisse ermöglicht werden.

7 Durchgeführte Transfermaßnahmen

Die zur Projektlaufzeit durchgeführten sowie die nach Projekteende geplanten Transfermaßnahmen lassen sich Kapitel 7.1 und Kapitel 7.2 entnehmen.

7.1 Durchgeführte Transfermaßnahmen (vom Projektstart bis zum Projektende)

Während der Projektlaufzeit wurden die in Tabelle 5 aufgelisteten Transfermaßnahmen geleistet.

Transfermaßnahme	**Datum**
Erstellung und Pflege einer Projekt-Website	01.01.2023 bis 31.06.2025
Treffen des projektbegleitenden Ausschusses	19.01.2023
Wöchentliche digitale Showroom Events in Aachen (FVP)	01.04.2022 bis 31.12.2023
Vorstellung der Projektergebnisse in den Vorlesungen „Mechatronik und Steuerungstechnik für Produktionsanlagen“, „NC-Programmierung von Werkzeugmaschinen“ und „Automatisierungstechnik für Produktionssysteme“ des WZL	04/2023 bis 05/2025
Vorstellung des Projektes und der erzielten Ergebnisse auf dem General Meeting der EXAPT Systemtechnik GmbH in Wiesbaden	03.05.2023 bis 04.05.2023
Vorstellung des Projekts und der erzielten Projektergebnisse im Rahmen des Aachener Werkzeugmaschinenkolloquiums AWK 2023 in Aachen	11.05.2023 bis 12.05.2023
Treffen des projektbegleitenden Ausschusses	17.06.2023
Treffen des projektbegleitenden Ausschusses	14.09.2023
Vorstellung der Projektergebnisse auf der Weltleitmesse für Produktionstechnologie EMO 2023 in Hannover	18.09.2023 bis 23.09.2023
Treffen des projektbegleitenden Ausschusses	16.12.2023
Vorstellung der Ergebnisse auf der Mitgliederversammlung FVP in Aachen	21.02.2024 bis 22.02.2024
Projektvorstellung auf dem AKL – International Laser Technology Congress 2024	17.04.2024 bis 19.04 2024
Treffen des projektbegleitenden Ausschusses	18.04.2024
Vorstellung des Projektverlaufs auf der Hannover Messe 2024	22.04.2024 bis 26.04 2024
Vorstellung des Projektes und der erzielten Ergebnisse auf der Hauptversammlung der EXAPT Systemtechnik GmbH in Aachen	15.05.2024
Treffen des projektbegleitenden Ausschusses	15.08.2024
Vorstellung der Ergebnisse auf der Internationalen Messe für Metallbearbeitung AMB 2024 in Stuttgart	10.09.2024 bis 14.09.2024
Projektvorstellung auf der FormNEXT 2024	19.11.2024 bis 22.11.2024
Treffen des projektbegleitenden Ausschusses	13.03.2025

Projektvorstellung auf der Hannover Messe 2025	31.03.2025 bis 04.04.2025
Vorstellung der Ergebnisse auf der Mitgliederversammlung FVP in Aachen	08.04.2025 bis 09.04.2025
Vorstellung des Projektes und der erzielten Ergebnisse auf der Hauptversammlung der EXAPT Systemtechnik GmbH in Aache	14.05.2025 bis 15.05.2025
Treffen des projektbegleitenden Ausschusses	19.06.2025
Vorstellung der Projektergebnisse auf der Weltleitmesse für Produktionstechnologie EMO 2025 in Hannover	22.09.2025 bis 26.09.2025
Vorstellung der Projektergebnisse auf der FormNEXT 2025	18.11.2025 bis 21.11.2025

7.2 Geplante Transfermaßnahmen (nach Projektende)

Es sollen in Zukunft sowohl öffentliche Förderformate als auch bilaterale Industrieprojekte an dieses Projekt anschließen. Der Demonstrator dient dabei als greifbares Transferobjekt, an dem die Funktionsweise des Regelungsprinzips anschaulich gezeigt werden kann.

Am 29. und 30. April 2027 findet das Aachener Werkzeugmaschinen-Kolloquium (AWK) statt. Unter dem Leitthema „Shaping Future Production“ werden einem breiten Publikum u. a. die Inhalte und Ergebnisse des DexPro-Projektes vorgestellt. Der enge fachliche Austausch und die Diskussion mit zahlreichen Anwendern sowie ausgewiesenen Experten anderer Forschungsinstitute werden dabei neue Impulse liefern. Darüber hinaus sind seitens IAPT und FVP weitere Transfermaßnahmen nach Projektende geplant. Die geplanten Maßnahmen lassen sich Tabelle 6 entnehmen.

Tabelle 6: Geplante Transfermaßnahmen

Transfermaßnahme	**Datum**
Vorstellung des Projektes und einer Ergebnisse im IAPT-Jahresbericht 2026	01/2026
Veröffentlichung des Schlussberichts auf den Websites von IAPT und FVP	03/2026
Vorstellung der Projektergebnisse in den Vorlesungen „Mechatronik und Steuerungstechnik für Produktionsanlagen“, „NC-Programmierung von Werkzeugmaschinen“ und „Automatisierungstechnik für Produktionssysteme“ des WZL	04/2026 bis 11/2026
Vorstellung des Projekts und der erzielten Projektergebnisse im Rahmen des Aachener Werkzeugmaschinenkolloquiums AWK 2027 in Aachen	29.04.2027 bis 30.04.2027
Vorstellung der Projektergebnisse auf der Messe „Toolmanagement in der Praxis 2026“ in Böblingen	04.03.2026 bis 05.03.2026
Vorstellung der Ergebnisse auf der Mitgliederversammlung FVP in Aachen	06.05.2026 bis 07.05.2026

Vorstellung des Projektes und der Projektergebnisse auf der Hauptversammlung und technischen Tagung der EXAPT Systemtechnik GmbH in Aachen	06.05.2026 bis 07.05.2026
Vorstellung der Ergebnisse auf der Internationalen Messe für Metallbearbeitung AMB 2026 in Stuttgart	15.09.2026 bis 19.09.2026

8 Literaturverzeichnis

[1] Dutta, B. u. Froes, F. H.: The Additive Manufacturing (AM) of titanium alloys. Metal Powder Report 72 (2017) 2, S. 96–106

[2] MX3D Bridge. https://mx3d.com/industries/infrastructure/mx3d-bridge/, abgerufen am: 01.07.2022

[3] Sertoglu, K.: WAAM3D Launches New Robowaam 3D printer, Sciaky breaks deposition rate record, 2022. https://3dprintingindustry.com/news/waam3d-launches-new-robowaam-3d-printer-sciaky-breaks-deposition-rate-record-210529/

[4] Soylemez, E.: High deposition rate approach of selective laser melting through defocused single bead experiments and thermal finite element analysis for Ti-6Al-4V. Additive Manufacturing 31 (2020), S. 100984

[5] Goodarzi, D. M., Pekkarinen, J. u. Salminen, A.: Analysis of laser cladding process parameter influence on the clad bead geometry. Welding in the World 61 (2017) 5, S. 883–891

[6] Amine, T., Newkirk, J. W. u. Liou, F.: Investigation of effect of process parameters on multilayer builds by direct metal deposition. Applied Thermal Engineering 73 (2014) 1, S. 500–511

[7] Spranger, F., Graf, B., Schuch, M., Hilgenberg, K. u. Rethmeier, M.: Build-up strategies for additive manufacturing of three dimensional Ti-6Al-4V-parts produced by laser metal deposition. Journal of Laser Applications 30 (2018) 2, S. 22001

[8] Stifter, S.: Simulation of NC machining based on the dexel model: A critical analysis. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 10 (1995) 3, S. 149–157

[9] Schnös, F., Hartmann, D., Obst, B. u. Glashagen, G.: GPU accelerated voxel-based machining simulation. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 115 (2021) 1-2, S. 275–289

[10] Salehi, D. u. Brandt, M.: Melt pool temperature control using LabVIEW in Nd:YAG laser blown powder cladding process. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 29 (2006) 3-4, S. 273–278

[11] Song, L. u. Mazumder, J.: Feedback Control of Melt Pool Temperature During Laser Cladding Process. IEEE Transactions on Control Systems Technology 19 (2011) 6, S. 1349–1356

[12] Tang, L. u. Landers, R. G.: Melt Pool Temperature Control for Laser Metal Deposition Processes—Part II: Layer-to-Layer Temperature Control. Journal of Manufacturing Science and Engineering 132 (2010)

[13] Tang, L. u. Landers, R. G.: Melt Pool Temperature Control for Laser Metal Deposition Processes—Part I: Online Temperature Control. Journal of Manufacturing Science and Engineering 132 (2010)

[14] Heilemann, M., Jothi Prakash, V., Beulting, L. u. Emmelmann, C.: Effect of heat accumulation on the single track formation during laser metal deposition and development of a framework for analyzing new process strategies. Journal of Laser Applications 33 (2021) 1, S. 12003

[15] Möller, M., Ewald, A., Weber, J., Heilemann, M., Herzog, D. u. Emmelmann, C.: Characterization of the anisotropic properties for laser metal deposited Ti-6Al-4 V. Journal of Laser Applications 29 (2017) 2, S. 22308

[16] Heilemann, M., Möller, M., Emmelmann, C., Burkhardt, I., Riekehr, S., Ventzke, V., Kashaev, N. u. Enz, J.: Laser Metal Deposition of Ti-6Al-4V Structures: Analysis of the Build Height Dependent Microstructure and Mechanical Properties. Contributed Papers from MS&T17. MS&T17 2017, S. 312–320

[17] Petrat, T., Winterkorn, R., Graf, B., Gumenyuk, A. u. Rethmeier, M.: Build-up strategies for temperature control using laser metal deposition for additive manufacturing. Welding in the World 62 (2018) 5, S. 1073–1081

[18] Mukherjee, T. u. DebRoy, T.: A digital twin for rapid qualification of 3D printed metallic components. Applied Materials Today 14 (2019), S. 59–65

[19] Ding, D., Pan, Z., Cuiuri, D. u. Li, H.: A practical path planning methodology for wire and arc additive manufacturing of thin-walled structures. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 34 (2015), S. 8–19

[20] Wohlers Report 2020. 3D Printing and Additive Manufacturing, Wohlers, T., Campbell, I., Diegel, O., Huff, R. u. Kowen, J., 2021

[21] AMPOWER REPORT 2021. Metal Additive Manufacturing, Munsch, M., Schmidt-Lehr, M., Wycisk, E. u. Führer, T., 2021

[22] Ahn D-G (2021) Directed Energy Deposition (DED) Process: State of the Art. Int J of Precis Eng and Manuf.-Green Tech 8:703–742. https://doi.org/10.1007/s40684-020-00302-7

[23] Thompson SM, Bian L, Shamsaei N et al. (2015) An overview of Direct Laser Deposition for additive manufacturing; Part I: Transport phenomena, modeling and diagnostics. Additive Manufacturing 8:36–62. https://doi.org/10.1016/j.addma.2015.07.001

[24] Lia F, Park J, Tressler J et al. (2017) Partitioning of laser energy during directed energy deposition. Additive Manufacturing 18:31–39. https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.08.012

[25] Weisheit A, Gasser A, Backes G et al. (2013) Direct Laser Cladding , Current Status and Future Scope of Application. In: Majumdar JD, Manna I (eds) Laser-Assisted Fabrication of Materials, vol 161. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp 221–240

[26] Toyserkani E, Khajepour A, Corbin SF (2004) Laser Cladding. CRC Press

[27] Heigel JC (2018) Thermo-Mechanical Modeling of Thin Wall Builds using Powder Fed Directed Energy Deposition. In: Thermo-Mechanical Modeling of Additive Manufacturing. Elsevier, pp 137–151

[28] Nabhani M, Razavi RS, Barekat M (2018) An empirical-statistical model for laser cladding of Ti-6Al-4V powder on Ti-6Al-4V substrate. Optics & Laser Technology 100:265–271. https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2017.10.015

[29] Wolff SJ, Lin S, Faierson EJ et al. (2017) A framework to link localized cooling and properties of directed energy deposition (DED)-processed Ti-6Al-4V. Acta Materialia 132:106–117. https://doi.org/10.1016/j.actamat.2017.04.027

[30] Stavropoulos P, Foteinopoulos P (2018) Modelling of additive manufacturing processes: a review and classification. Manufacturing Rev 5:2. https://doi.org/10.1051/mfreview/2017014

[31] Abbes B, Anedaf T, Abbes F et al. (2021) Direct energy deposition metamodeling using a meshless method. EC 38:1226–1240. https://doi.org/10.1108/EC-10-2019-0447

[32] Hayes BJ, Martin BW, Welk B et al. (2017) Predicting tensile properties of Ti-6Al-4V produced via directed energy deposition. Acta Materialia 133:120–133. https://doi.org/10.1016/j.actamat.2017.05.025

[33] Wei HL, Mukherjee T, Zhang W et al. (2021) Mechanistic models for additive manufacturing of metallic components. Progress in Materials Science 116:100703. https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2020.100703

[34] Zhao Y, Jia Y, Chen S et al. (2020) Process planning strategy for wire-arc additive manufacturing: Thermal behavior considerations. Additive Manufacturing 32:100935. https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100935

[35] Ye J, Bab-Hadiashar A, Hoseinnezhad R et al. (2022) Predictions of in-situ melt pool geometric signatures via machine learning techniques for laser metal deposition. International Journal of Computer Integrated Manufacturing:1–17. https://doi.org/10.1080/0951192X.2022.2048422

[36] Möller M, Baramsky N, Ewald A et al. (2016) Evolutionary-based Design and Control of Geometry Aims for AMD-manufacturing of Ti-6Al-4V Parts. Physics Procedia 83:733–742. https://doi.org/10.1016/j.phpro.2016.08.075

[37] Prakash VJ, Surrey P, Möller M et al. (2018) Influence of adaptive slice thickness and retained heat effect on laser metal deposited thin-walled freeform structures. Procedia CIRP 74:233–237. https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.08.101

9 Anhang

9.1 Experimentale Datensätze

	Row No	Nahthöhe (μm)	Nahtbreite (μm)	Geschwindigkeit (m/s)	Laserleistung (W)	Pulverdurchflussmenge (RPM)
Test set 1:	1	674.42	2436.19	0.03	1350	7
	2	678.04	2476.43	0.03	1350	7
	3	646.01	2308.45	0.03	1350	7
Test set 2:	1	707.72	2446.23	0.03	1425	7
	2	701.36	2415.73	0.03	1425	7
	3	673.08	2450.68	0.03	1425	7
PP Set 3 as comparison 1:	1	684.28	2527.56	0.03	1500	7
	2	699.46	2552.45	0.03	1500	7
	3	714.69	2562.55	0.03	1500	7
PP Set 3 as comparison 2:	1	747.19	2568.23	0.03	1500	7
	2	724.86	2450.72	0.03	1500	7
	3	742.32	2455.76	0.03	1500	7
Test set 3:	1	722.6	2522.27	0.03	1575	7
	2	706.02	2557.7	0.03	1575	7
	3	750.75	2552.37	0.03	1575	7
Test set 4:	1	747.64	2684.6	0.03	1650	7
	2	729.35	2659.16	0.03	1650	7
	3	735.01	2623.72	0.03	1650	7
Test set 5:	1	861.57	2633.72	0.02	1500	7
	2	893.17	2659.18	0.02	1500	7
	3	891.81	2679.78	0.02	1500	7

Test set 6:	1	769.27	2496.52	0.02	1500	7
	2	806.13	2567.62	0.02	1500	7
	3	802.4	2567.64	0.02	1500	7
PP Set 3 as comparison 1:	1	684.28	2527.56	0.03	1500	7
	2	699.46	2552.45	0.03	1500	7
	3	714.69	2562.55	0.03	1500	7
PP Set 3 as comparison 2:	1	747.19	2568.23	0.03	1500	7
	2	724.86	2450.72	0.03	1500	7
	3	742.32	2455.76	0.03	1500	7
Test set 7:	1	652.54	2491.44	0.03	1500	7
	2	610.57	2521.94	0.03	1500	7
	3	610.21	2379.84	0.03	1500	7
Test set 8:	1	588.97	2405.46	0.03	1500	7
	2	568.49	2389.8	0.03	1500	7
	3	599.74	2369.41	0.03	1500	7
Test set 9:	1	605.58	2476.23	0.03	1500	6
	2	663.91	2532.11	0.03	1500	6
	3	653.06	2455.78	0.03	1500	6
Test set 10:	1	668.21	2465.95	0.03	1500	6.5
	2	686.39	2521.86	0.03	1500	6.5
	3	674.94	2608.42	0.03	1500	6.5
PP Set 3 as comparison 1:	1	684.28	2527.56	0.03	1500	7
	2	699.46	2552.45	0.03	1500	7
	3	714.69	2562.55	0.03	1500	7
PP Set 3 as comparison 2:	1	747.19	2568.23	0.03	1500	7
	2	724.86	2450.72	0.03	1500	7
	3	742.32	2455.76	0.03	1500	7

Test set 11:	1	743.71	2455.89	0.03	1500	7.5
	2	763.08	2425.6	0.03	1500	7.5
	3	712.59	2466.36	0.03	1500	7.5
Test set 12:	1	768	2491.36	0.03	1500	8
	2	738.98	2506.79	0.03	1500	8
	3	727.29	2395.09	0.03	1500	8