DLR Projektträger

Projektträger für das
Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

INDUSTRIELLE GEMEINSCHAFTSFORSCHUNG

Schlussbericht vom 31.12.2025

zum IGF-Vorhaben 22717 N

Thema

SimuControl - Simulationsgestützte, intermittierende Prozessausreglung zur Verbesserung der Formgebung von DED-Prozessen

Berichtszeitraum

01.01.2023 bis 30.06.2025

Forschungsvereinigung

Forschungsvereinigung Programmiersprachen für Fertigungseinrichtungen (FVP) e.V.
Theaterstraße 12
52062 Aachen

Forschungseinrichtung(en)

Forschungsvereinigung Programmiersprachen für Fertigungseinrichtungen (FVP) e.V.
Theaterstraße 12
52062 Aachen

Fraunhofer Institut für Lastertechnik (ILT)
Steinbachstraße 15
52074 Aachen

[[FVP]]

INDUSTRIELLE GEMEINSCHAFTSFORSCHUNG

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung und Motivation 3

2 Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse 10

2.1 Arbeitspaket 1: Ableitung von Anwendungsfällen 10

2.2 Arbeitspaket 2: Schnittstellen für Regelung, Inbetriebnahme des Demonstrators und Parameterstudien 15

2.3 Arbeitspaket 3: Modellbildung zur geometrischen Simulation 27

2.4 Arbeitspaket 4: Kopplung Simulation und Werkzeugbahnplanung 28

2.5 Arbeitspaket 5: Befähigung von geometrischer Modelladaption, modellbasierte lagenweise Steuerungsanpassung und automatische Analyse und Beurteilung Prozessergebnis 31

2.6 Arbeitspaket 6: Evaluierung der Wirksamkeit 36

2.7 Arbeitspaket 7: Projektergebnisse 38

3 Verwendung der Zuwendung 39

4 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit 39

5 Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU sowie ihres innovativen Beitrags und ihrer industriellen Anwendungsmöglichkeiten 40

6 Wissenstransfer in die Wirtschaft 41

7 Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft 42

7.1 Durchgeführte Transfermaßnahmen (vom Projektstart bis zum Projektende) 42

7.2 Geplante Transfermaßnahmen (nach Projektende) 43

1 Einleitung und Motivation

Additive Fertigungsprozesse (engl: Additive Manufacturing, AM) werden in der Industrie als wichtiger Baustein zur Deckung zukünftiger Bedarfe hinsichtlich sich verändern-der Bauteil- und Fertigungskomplexität angesehen. Den wachsenden Anforderungen hinsichtlich Designs, flexiblen Werkstoffeigenschaften und Funktionen begegnet AM durch lagenweisen Aufbau bei gleichzeitig präziser Steuerungs- und Überwachungsmöglichkeit. Ein Teilgebiet von AM ist die Directed Energy Deposition (kurz: DED), das sich neben der additiven Herstellung von Komponenten als Reparatur- und Beschichtungsverfahren sowie zur gezielten Funktionalisierung vorgefertigter Basis-bauteile eignet (s. Abbildung 1). Im Rahmen von SimuControl wird das laserbasierte (LB-) DED verwendet. Gerade für den Sektor LB-DED (Pulver + Draht) wird ein nomineller Zuwachs von 1800 AM Anbietern im EMEA-Sektor und ein Umsatzwachstum von 91.5 M€ (2020) auf 326M€ (2025) antizipiert - mit einem Zuwachs von 534 Anbietern und 220M€ Umsatz im Bereich Metallbearbeitung allein. Dabei ist der Großteil der Anbieter Start-ups (26%) und KMUs (43%) (2020). Dem entgegen wird jedoch als einer der Hauptziele für die Etablierung von AM-Prozessen die Beschleunigung der Produktentwicklung angeführt. Um der bis 2030 antizipierten Verlagerung der Produktion weg von globalen Lieferketten und hin zu lokaler Produktion gerecht zu werden und die prognostizierte Lücke zwischen Angebot und Nachfrage im Bereich DED zu schließen (701 Anbieter gegenüber 880 Abnehmern; 2025), müssen daher vor allem kleine und mittelständische Unternehmen befähigt werden, den AM-Prozess zu beherrschen.

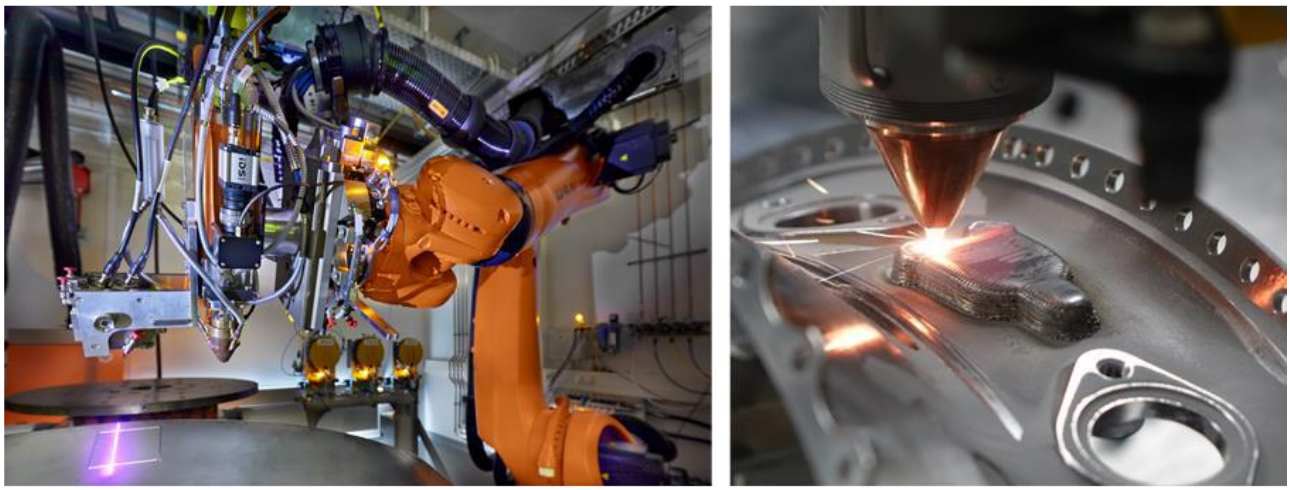

Abbildung 1: Roboteranlage mit geometrischer Erfassung einer Schweißlage (links), Nahaufnahme während des DED-Aufbaus eines Boroskop-Flansches auf einem Turbinenzwischengehäuse (rechts)

Weitere zum LB-DED Verfahren synonym verwendete Begriffe sind Laser Engineered Net Shaping (LENS), Direct Laser Fabrication (DLF), Direct Metal Deposition (DMD) oder auch Laser Material Deposition (LMD). Durch Fokussierung eines Laserstrahls auf ein Substrat wird hierbei ein lokal begrenztes Schmelzbad ausgebildet. Diesem wird gleichzeitig ein pulver- oder drahtförmiger Zusatzwerkstoff zugeführt. Zwischen dem im Schmelzbad verflüssigten Zusatzwerkstoff und dem umgeschmolzenen Substrat wird bei der Erstarrung eine

schmelzmetallurgische Verbindung erzeugt. Durch horizontale und vertikale Überlagerung von Spuren können 3D-Geometrien erzeugt werden. Im Rahmen von SIMUCONTROL fokussieren wir uns aufgrund der vergleichs-weisen guten Beherrschbarkeit auf den pulver-basierten LB-DED Prozess, da gerade dieser ein hohes Potenzial zur Industrialisierung aufweist.

Das wesentliche, derzeitige Defizit für die Etablierung des LB-DED Verfahrens ist die erfahrungsbasierte, iterative Entwicklung von Prozessen für jede neue Anwendung. Geschwindigkeit und Erfolg dieser Entwicklungen ist stark vom Know-How und Erfahrung der Anwender abhängig, da nur wenige objektive Kriterien zur Beurteilung der Prozessqualität verfügbar sind. Als Integrationshemmnis werden im Jahr 2020 daher von 51% der Befragten einer Studie vor allem Wissenslücken angegeben. Dadurch können die an AM-Prozesse gelegten hohen Erwartungen als disruptive Fertigungstechnologie gerade für KMU schwer erfüllt werden.

Abbildung 2: Zum Ideal (Bild links, Mitte) abweichender Pulverfokus-Offset (Bild links, Links+Rechts) begünstigt instationäres Verhalten (Von Prozessdefiziten bis zum vollständigen Prozessabbruch).

Ausgangssituation Die Planung von Prozessen in der additiven Fertigung erfolgt nach aktuellem Stand stets A-Priori. Einer der wichtigsten Wirkzusammenhänge zur Einhaltung eines stationären Prozessverhaltens ist die Einhaltung der in der CAM-Planung definierten Schichtdicke, da dadurch die Foki von Pulverzufuhr und Laserstrahl kohärent liegen. Wird diese über den Prozess hinweg eingehalten, so kann ein Bauteil in seiner Form mit minimalen Abweichungen hergestellt werden. Weicht die Schichtdicke jedoch während des Prozesses ab, so versetzt sich die Höhe der geschweißten Lage um das Delta der Schichtdicke und verschiebt den idealen Arbeits-abstand des Schweißkopfes und reduziert somit die vorgegebene Schichtdicke (siehe Abbildung 2 links, linkes Bild und rechtes Bild).

Extrinsische Einflussfaktoren auf die Prozessstabilität

Einflussfaktoren für ab-weichende Schichtdicken sind u.A. suboptimale Prozessparametrisierung, Verfahrensstrategie als auch Systemtechnik und begünstigen bei DED-Prozessen neben ungleichmäßigen Auftragshöhen außerdem Defektbildung und Verzüge bis hin zum notwendigen Prozessabbruch durch den Bediener. Dabei steht gerade die Bildung von Defekten der Sicherung der geforderten Bauteileigenschaften im Weg. Zu-dem muss die Gefahr des Prozessabbruches durch eine ständige Überwachung durch einen

Maschinenbediener abgefangen werden. Die Auswirkung einer einzelnen Schwankung auf den Prozess wird durch die lagenweise Auslegung des Prozesses noch verschärft. Stellt sich erstmal eine nominelle Abweichung in der Auftragshöhe ein, so pflanzt sich der Fehler mit jeder Lage nicht nur fort, sondern verstärkt sich stattdessen mit der stetig steigenden Abweichung im Pulverfokus-Offset der jeweils nächsten Lage.

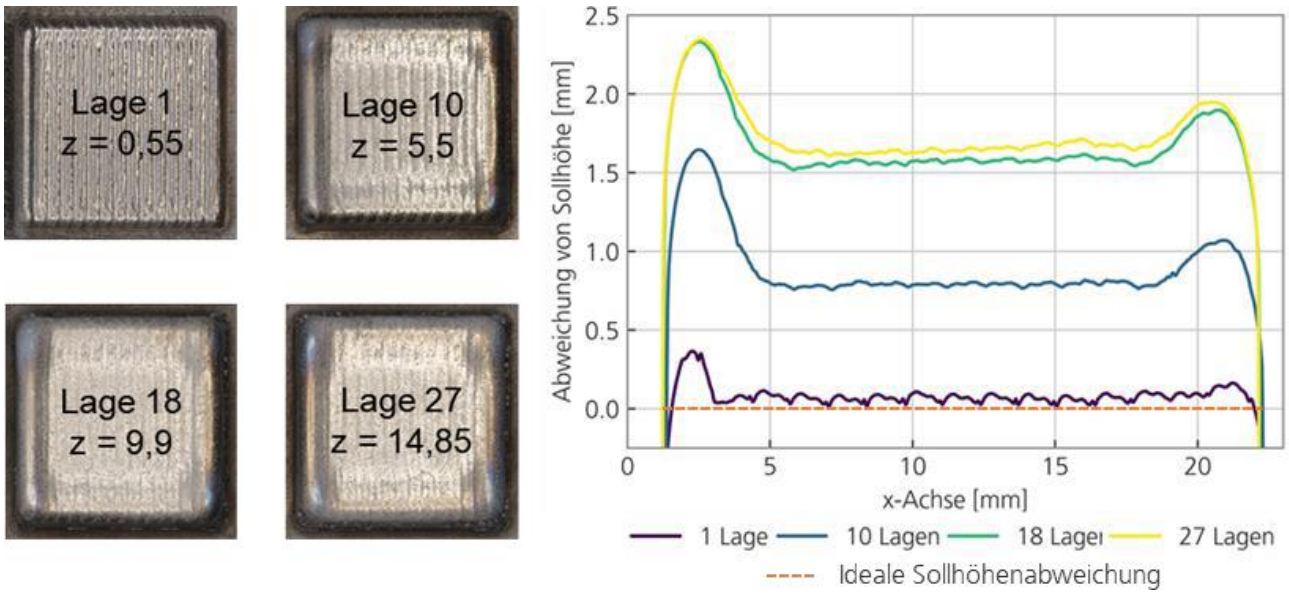

Abbildung 3: (Links) Draufsicht einzelner Lagen einer Probe (konstante Parameterisierung) mit verstärk-ten Abweichungen zur geplant planaren SOLL-Geometrie an den Rändern des Bauteils. Fehlerfortpflan-zung über Lagen hinweg. (Rechts) Gemitteltes Querschnittsprofil geschweißter Lagen dargestellt als relative Abweichung zur idealen Sollhöhe. Die lagenweise Abweichung vergrößert sich von Lage 1 bis hin zu Lage 18. Ab Lage 18 wiederum stagniert die Abweichung bis hin zu Lage 27.

Intrinsische Einflussfaktoren auf die Prozessstabilität

Neben den extrinsischen Einflussgrößen spielt die intrinsische Prozessdynamik ebenfalls mit in die Prozessschwankungen mit rein. So kann bei einem einzelnen Prozess mit konstanten Schicht-dicken sowie konstanten Prozessparametern mit jeder Lage und bereits beginnend bei der ersten Lage eine nicht-lineare Vergrößerung der Schweißspuren und der so erziel-baren Aufbaurate festgestellt werden (Abbildung 3). Von besonderem Interesse sind die Randbereiche der Geometrie, bei welchen sich deutlich stärkere Abweichungen der Aufbauhöhe einstellen als im Lagenzentrum. Ab einer bestimmten Anzahl an prozessierten Lagen stagniert die Vergrößerung der Aufbaurate und es stellt sich ein quasi-stationärer Prozesszustand ein. Insgesamt stellt sich eine Abweichung der Soll-höhe für jede Lage ein, sowohl lokal als auch global. Durch den lagenweisen Aufbau des Prozesses kann der Randbereich einer vorherigen Lage das Volumen für den Füllbereich der nächsten Lagen vorgeben, wodurch sich Abweichungen durch mehrere Geometriebereiche (Rand, Füllung) fortpflanzen können. Je mehr Lagen aufgebaut werden, desto defektanfälliger wird der Prozess, was insbesondere für Großbauteile eine zentrale Rolle spielt. Dieses Phänomen kann teilweise durch die Prozessthermik erklärt werden, welche einen großen Einfluss auf erreichbare Schichtdicke und Spurbreiten hat. Nach

Prozessierung weniger Lagen stellt sich ein konstanter Vorheizeffekt im Material ein. Dies resultiert in einem stabilen Schmelzbad mit konstanter Breite und Höhe ein. Grund dafür ist, dass mit steigender Materialtemperatur das Schmelzbad wächst, was zu höheren Aufbauraten bei sonst gleichbleiben-den Prozessparametern führt. Für die ersten Lagen bleibt dieser Vorheizeffekt aus, es stellen sich stark schwankende Schichtdicken ein. Um trotz ausbleibenden Vor-heizeffekt dennoch konstante Schichtdicken zu ermöglichen, kann bspw. die Laser-leistung dynamisch angepasst werden, mit der der lokale Energieeintrag gesteuert werden kann.

Methoden zur Prozessparameterauslegung und -optimierung für DED-Prozesse

Als Folge intrinsischer sowie extrinsischer Ursachen für Prozessschwankungen dient die initiale Prozessauslegung nur als Startpunkt für das Erreichen der geforderten Bauteiltoleranzen und -qualitäten. Nach der Durchführung des ersten Durchlaufs kontrolliert der Prozessexperte den Prozess auf Abweichungen der festgelegten geometrischen Qualitätsgrößen (bspw. Spurbreite und Schichtdicke) und iteriert die Parameter innerhalb der sogenannten Trial-and-Error Phase bis das gewünschte Ergebnis er-zielt wird. In das iterativ und händisch gelöste Optimierungsproblem fließen Bauteilgeometrie-, Material- sowie Maschinen-abhängige Erfahrungswerte der Operators mit ein. Dadurch ist der DED-Prozess gerade für kmU schwer er-schließbar. Bei neuer Kombination aus Bauteil und Material findet zuerst eine grund-legende Erprobung der Prozessstrategie sowie -parametrisierung statt. In einem typischen Vorgang wird das Materialverhalten durch sukzessiven Aufbau von Einzelspuren, gefolgt von Einzelstegen und Quadergeometrien für den DED-Prozess untersucht. Aufgrund der hohen Freiheitsgrade in der Auslegung der Prozessstrategie und -parameterisirung ist die für das Bauteil individualisierte Prozessauslegung gerade für KMU zeitaufwändig und kostenintensiv. Vergleicht man die iterative Vorgehensweise mit der intrinsischen Prozessdynamik, so erscheint die Methodik der A-Priori Prozessplanung unzureichend, da in einem DED-Prozess die Parametrisierung ständig an die Prozessschwankungen angepasst werden muss. Selbst an-hand der Parameterstudien zu Quadergeometrien wird immer nur ein Prozessparameter abgeleitet, welcher als konstanter Parameter zur Auslegung der A-Priori Prozess-planung benutzt wird.

CAM-Planung in der additiven Fertigung

Sind die Prozessparameter gefunden, so wird die CAM-Planung für den Prozess erstellt. Die Planung beginnt bei der Übermittlung der Konstruktionsdaten – insbesondere der CAD-Daten – vom Auftraggeber an das KMU. Um den Fertigungsprozess mittels eines CAM-Systems auszulegen, spielen neben der geometrischen Toleranz weitere Bauteilqualitäten wie vorgegebene Härte und Gefügedichte eine Rolle. Zur Verifikation der Programmierung kann eine CAM-integrierte Simulation erfolgen. Hierbei wird von einem idealen Prozess mit konstantem Schichtdickenauftrag ausgegangen. Bei der Simulation findet die DED-typische Prozessdynamik bisher keine Berücksichtigung. Nach der Auslegung der CAM-Planung erfolgt eine Übersetzung derer in ein

NC-Programm mittels eines anlagen-spezifischen Post-Prozessors. Ab diesem Zeitpunkt lässt sich kein direkter Zusammenhang mehr zwischen den Flächen des CAD-Modells und den Werkzeugbahnen der CAM-Planung ermitteln. Änderungen am NC-Programm können daher nicht auf direktem Weg ins CAM-System zurückfließen, beispielsweise technologische Anpassungen aufgrund einer Prozessstörung oder Prozesswartezeiten zur Aus-gleichung von Prozessdynamiken durch den Maschinenbediener.

Fazit

Durch sowohl prozessintrinsische, -extrinsische als auch die Prozessplanung begleitende Einflussfaktoren leiten sich deutliche Defizite in dessen Einhaltung zur Maßhaltigkeit ab, wodurch die Adaption von DED-Prozessen für KMU unattraktiv bleibt. Hier sind im Wesentlichen folgende Punkte zu nennen:

- Die Ursache für Prozessschwankungen ist vielseitig. Zu nennen sind teilweise nicht prozessangepasste CAM-Planung, fehlende Abbildung der Prozessdynamik zur Ausregelung Prozessstadien-abhängiger Schichtdicken sowie nicht vollständig optimierte Prozessparameter. Zahlreiche Einflüsse sind bisher nur qualitativ er-fassbar und können nicht vollständig kontrolliert werden.
- Der Bezug zwischen Qualitätsergebnissen und den einzelnen Stationen der Prozessauslegung ist nur schwer herzustellen. Somit ist nur eine eingeschränkte Ursachenanalyse beim Auftreten von Toleranzfehlern bzw. Qualitätsmängeln möglich.
- Tritt ein instationäres Verhalten innerhalb des DED-Prozesses einmal auf, so führt dieses im weiteren Prozessverlauf aufgrund des lagenweisen additiven Aufbaus eines Bauteils nicht nur zu gleichbleibenden Folgen abweichender Auftragshöhe, sondern verschlimmert sich tendenziell eher noch. Bisher ist es nicht möglich, online oder lagenweise automatisiert auf den Prozess bei der Fertigung mit für AM typischen Verfahrensstrategien zu reagieren.
- Nach aktuellem Stand der Technik ist die Anpassung eines DED-Prozesses für in-dividuelle Geometrien mit einem iterativen, erfahrungsbasierten Verfahren verbunden. Eine zeit- und kosteneffiziente und insbesondere erfahrungsunabhängige Prozessoptimierung existiert bisher nicht.

Die Beherrschung von DED-Prozessen hin zu einem stabilen, stationären Prozessverhalten ohne Bindung an einen Prozessexperten ist entscheidend für die Etablierung dieser in der Industrie. Dies ist aktuell bei KMU nicht gegeben. Daraus erwächst die Notwendigkeit, DED-Prozesse soweit auszuregeln, dass diese mit hoher Zuverlässigkeit beherrscht werden können. Das Projektziel ist daher die Entwicklung eines Lösungsansatzes zur intermittierenden Prozessausregelung von DED-Prozessen. Hierbei wird mittels A-Priori Prozessanalytik aus CAD-Modell und Bahnplanung ein Simulationsmodell der geplanten Prozess-führung erstellt und während des Prozesses über geometrische Datenrückführung intermittierend an den reellen Prozesszustand angepasst wird, woraus eine geeignete Prozessausregelung erzielt werden kann. Zur Erfassung der benötigten Messdaten wird eine mit einem Laserlinienscanner bestückte, vorliegende Demonstrator-Anlage (s.

Abbildung 1) verwendet, um lagenweise intermittierend den geometrischen IST-Zustand zu ermitteln. Das Simulationsmodell wird während eines laufenden Prozesses über die Zufuhr von Live-Messdaten verbessert und dient somit dient als Lookup zur Korrektur bei Wiederholung des Prozesses. Aus der geometrischen Korrektur des Simulationsmodells wird CAM-seitig eine technologische Anpassung der kommenden Bahnplanung bestimmt und in den NC-Code zurückgespielt, sodass entstehende Geometrieabweichungen ausregelt werden können. Langfristig lassen sich zudem aus den Simulationsmodellen Wirkzusammenhänge für die CAM-seitige Prozessführung zur Verbesserung der Planungsqualität ableiten, sodass künftig ganz auf prozessparallele Regelung verzichtet werden kann. Hierbei können mittels Auswertung der trainierten Modelle gezielt nach Ähnlichkeiten und Unterschieden in der Prozessführung gesucht und als erfahrungsbasiertes Regelwerks formuliert werden, welches CAM-Entwickler wiederum in die Bahnplanung zurückführen können.

Arbeitshypothese und Forschungsziele

Vor dem Hintergrund der diskutierten Defizite soll im Rahmen des Vorhabens ein ganzheitlicher Planungsansatz zur Verbesserung der Formgebung bei Pulver-basierten LB-DED-Prozessen erarbeitet werden, in dem A-priori-Simulationsdaten mit dem prozess-begleitend erhobenen Ist-Zustand gekoppelt und für Optimierungen des noch laufen-den Prozesses genutzt werden (Lösungshypothese). Der übergeordnete Zielzustand ist dabei selbst-verständlich einen Prozess bereits A-Priori so auslegen zu können, dass seine Ausführung bereits alle Qualitätsziele erfüllt. Da dies aufgrund nicht oder erst anteilig verstandener Ursache-Wirkzusammenhänge sowie zahlreicher stochastischer Einflussfaktoren aktuell nicht auf direktem Weg erreichbar scheint, ist im Projekt ein zweitstufiges Vorgehen geplant. Stufe 1: Kurzfristiges Ziel ist es, einen Regelungs-ansatz zu entwerfen, der eine intermittierende Prozessausreglung zur Steigerung der Formgebung ermöglicht. Hierbei sollen die im Rahmen der Prozessplanung erzeugten Simulationsdaten, die den Sollzustand jeder aufgetragenen Materialschicht geometrisch beschreiben, genutzt werden, um im Prozess intermittierend das Delta zwischen Soll- und Ist-Zustand zu erfassen. Damit sollen dann die Bahnbereiche nachfolgender Materialschichten identifiziert und durch geeignete, noch zu erforschende Maßnahmen angepasst werden, um eine Ausregelung zu erreichen. Die Fragen, die dem zugrunde liegen, lauten dabei:

- Wie lassen sich Ergebnisse einer geometrischen CAM-Simulation nutzen, um die Online-Kompensation zu unterstützen bzw. zu ermöglichen?
- Wie müssen pulver-basierte LMD-Prozesse ausgelegt und zur Laufzeit angepasst werden, um eine hohe Maßhaltigkeit zu erzielen?

Die Beantwortung dieser Fragen soll dabei in einen Hard- und Softwarekonzept münden, mit welchen sich die angestrebte Steigerung der Formtreue bereits heute im industriellen Umfeld erzielen lässt. Stufe 2: Mittel- bis langfristig muss es allerdings darum gehen, dieses Gesamt-konzept nur als Werkzeug zur Prozessvorentwicklung zu verstehen, mit dem sich Ursache-Wirkbeziehungen aufdecken und geeignete Gegen- bzw.

Optimierungsmaßnahmen identifizieren lassen. Letztere gilt es in Leitfäden für KMU sowie Bahnplanungsalgorithmen zu überführen, um die angestrebte optimale A-Priori-Prozessauslegung zu erreichen. Hierauf hinarbeitend sollen im Vorhaben aufbauend daher auch ein Rückführungs- und -auswertungs-konzept erarbeitet werden, mit dem sich initialer Prozess, Simulationsdaten sowie Messdaten aus der Regelung und Auswirkungen von Prozesskorrekturen kombinieren lassen, um darauf aufbauend rechnergestützt Erkenntnisse für den Aufbau von A-Priori-Planungslösungen ableiten zu können. In diesem Zusammenhang gilt es folgende Fragen zu klären:

- Wie lassen sich Messergebnisse zur Adaption des geometrischen Simulations-modells nutzen, um eine automatisierte Informationsrückführung zur Steigerung des Prozessverständnisses zu erreichen?
- Wie lässt sich das implizit in einem angereichtem Simulationsmodell enthaltene Fertigungswissen formalisieren und bei künftigen Planungen anwenden?

2 Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Zur Validierung der Arbeitshypothese wurden insgesamt sieben Arbeitspakete definiert. Nachfolgend werden für jedes Arbeitspaket die geleisteten Arbeiten und die erzielten Ergebnisse vorgestellt.

2.1 Arbeitspaket 1: Ableitung von Anwendungsfällen

In Arbeitspaket 1 galt es wirtschaftlich relevante Anwendungsfälle zu definieren und hieraus ableitbare Defizite zu erkennen. Ein hinreichend interessanter Prozesspara-meterraum wurde aufgestellt. Dargestellte Anwendungsfälle wurden analysiert und in einen Anforderungskatalog für modelltechnische Betrachtungen im Simulationsmodell überführt. Ein inhaltlicher Rahmen für den Leitfaden wurde aufgestellt.

Die Zusammenarbeit mit dem projektbegleitenden Ausschuss hat hierzu am 18.016.2023 begonnen. In der Diskussion wurden die aktuellen CAD-CAM-NC-Ketten in KMU ermittelt sowie potenzielle Beiträge in Form von Software, Anwendungsfällen, Anforderungen und Demonstrationen besprochen.

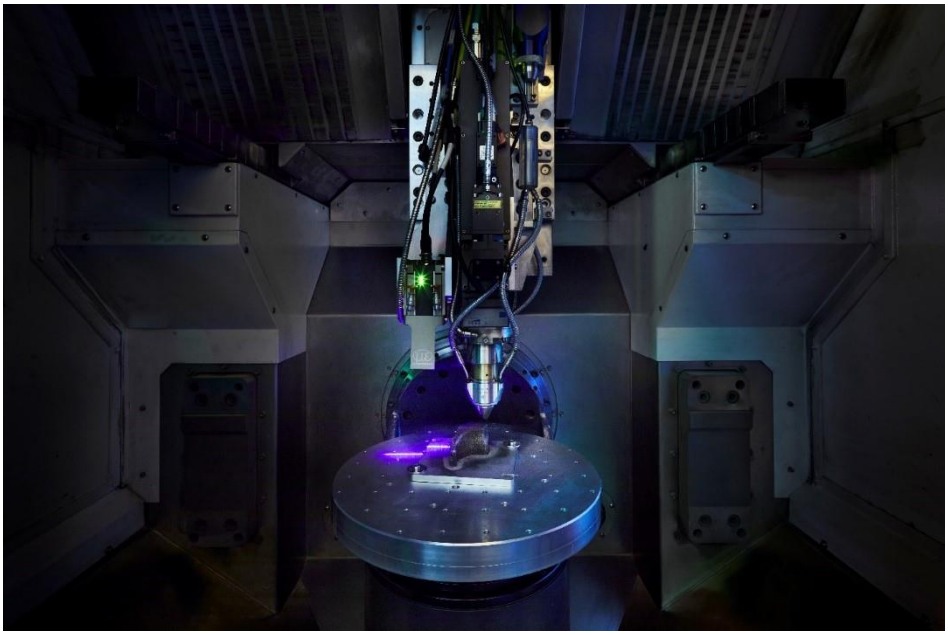

Abbildung 4: Makino AML500(MoKo) mit integriertem Laserlinien-scanner

Als Projektanlage wird eine LMD-Maschine des Typs AML500 der Firma Makino verwendet. Als Strahlquelle dient ein Laserline Diodenlaser mit einer Gauß-Verteilung. Für das pulverbasierte Laserauftragschweißen wird eine Trumpf-Fokussieroptik verwendet, welche mit einer koaxiale Pulverdüse des Typs HeighNo – 4.0 von HD-Sonderoptiken kombiniert wird. Die Bearbeitungsoptik verfügt über eine motorische Kollimationsverstellung (kurz MoKo, Abbildung 4).

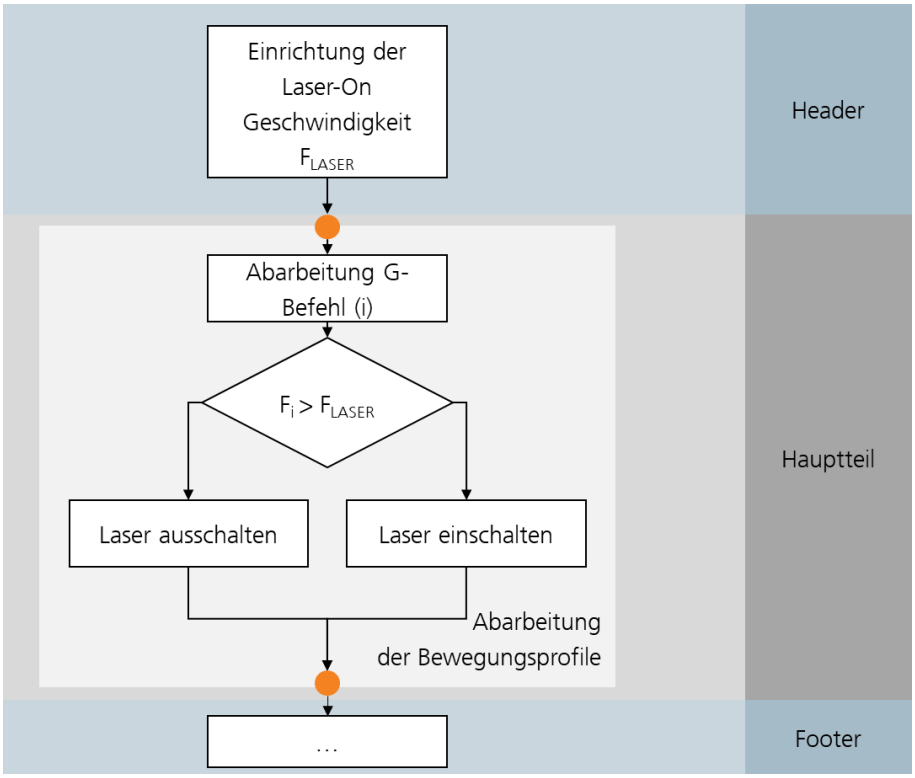

Abbildung 1: Schaltungslogik für Laser-An und -Aus auf der Makino AML500 aufgeteilt in Header, Hauptteil und Footer. Weitere Befehle in einem typischen G-Code sind hier zur Lesbarkeit ausgelassen.

Die Makino AML500 ist auf den Prozess Extremes Hochgeschwindigkeits-Laserauftragschweißen (EHLA) aufgelegt, weshalb der Laser schnell an- und ausge-schaltet werden können muss. Abbildung 5 zeigt die für den G-Code relevante Logik. Im Header wird über einen Spezialbefehl „FASTON X“ die Geschwindigkeit X festgelegt, welche in einem Verfahrbefehl (G-Befehle) überschritten werden muss, damit der Laser aufgeschaltet wird oder bleibt. Dies wird für jeden Befehl einzeln ausgewer-tet. Wird FASTON 2801 festlegt, so gilt für Verfahrbefehle mit höherem Vorschub F (bspw. G1 X0.000 Y0.010 Z0.000 F2802), dass der Laser ausgeht / -bleibt und für geringe Vorschübe, dass der Laser angeht / -bleibt. Dies ist untypisch, denn der Laser wird über eine implizite Logik innerhalb eines Verfahrbefehls gesteuert und nicht wie üblich über einen M-Befehl. M-Befehle werden jedoch über die langsamere SPS-Steuerung verarbeitet, während Verfahrebefehle über die schnelle NC-Steuerung verarbeitet werden, wodurch die Steuerung des Lasers eine höhere Dynamik erfährt.

Die Projektanlage verfügt über eine Schnittstelle zum CAM-Planungssoftware OpenARMS des Projektpartner BCT, die in Kombination mit einem Laserlinienscanner der Firma Micro-Epsilon die geometrische Erfassung von Bauteilen im Maschinenbauraum ermöglicht.

Im Rahmen der Diskussion mit PA über mögliche Anwendungsfälle und Demonstrator Bauteile konnte der Bereich des Turbinenbaus identifiziert werden. Daher wurde die nickelbasierte Superlegierung Alloy 718 (EN 2.4668) als Werkstoff ausgewählt. Bei dem verwendeten Pulverwerkstoff für den LB-DED-Prozess handelt es sich um MetcoAdd 718C der Firma Oerlikon mir einer Korngrößenverteilung von 15-45 µm. Die chemische Zusammensetzung der Legierung ist in Tabelle 1 aufgeführt.

Tabelle 1: Zusammensetzung Metco 718C

Element	Ni	Fe	Cr	Nb+Ta	Mo	Al	Ti	C	Sonst. Elem.
Gew.-%	Rest	18	18	5.0	3.0	0.6	1.0	0.08	<0.5

In Absprache mit dem PA wird eine geometrieunabhängige Lösung entwickelt, die ohne Einschränkungen sowohl für planare als auch für dreidimensionale additive Prozesse angewendet werden kann. Dadurch ist die Lösung auch für Beschichtungen und Reparaturen jeglicher Art einsetzbar.

Als nächster Schritt wurden mit dem PA die CAD-/CAM-/NC-Ketten für die experimentelle Parameterfindung beim LB-DED-Prozess erfasst und die Stationseigenschaften sowie Defizite systematisch identifiziert. Als generelle Prozesskette dient dafür Abbildung 6. Die Abbildung zeigt den etablierten Prozessablauf im LB-DED-Verfahren. Ausgehend von einer a-priori Bahn- und Prozessplanung wird zunächst der zugehörige NC-Code generiert. Anschließend erfolgt ein erster Aufbau mehrerer Lagen unter Verwendung dieser Startparameter. Nach diesem initialen Fertigungsschritt führt ein geschulter Operator eine visuelle und manuelle Inspektion des Zwischenstandes durch. Dabei werden Merkmale wie Schmelzbadgeometrie, Anhaftungen, Rauheit, Aufbaubreite und eventuelle Fehlstellen bewertet.

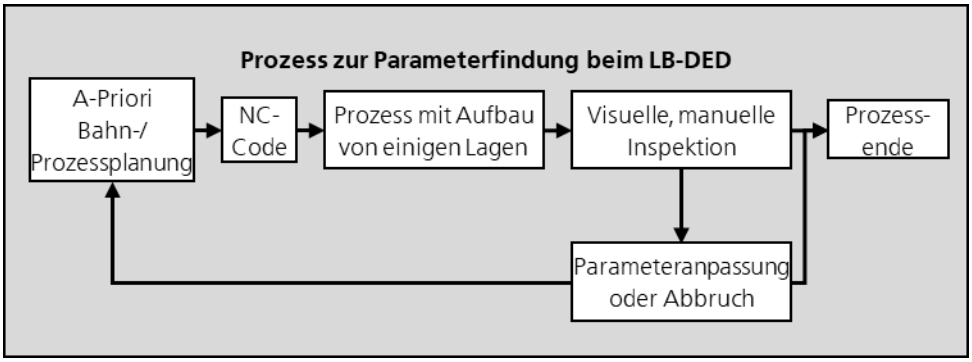

Abbildung 6: Prozess zur experimentellen Parameterfindung beim LB-DED Prozess

Auf Basis dieser Bewertung erfolgt entweder eine manuelle Parameteranpassung – etwa die Modifikation von Vorschub, Laserleistung oder Pulvermassenstrom – oder ein Prozessabbruch mit anschließender Neuplanung bspw. der Geometrie. Der iterative Charakter des Ablaufs ist durch die Rückkopplung zur Prozess- bzw. Bahnplanung verdeutlicht. Der Prozess endet, sobald die Parameterkombination ein stabiles, qualitativ ausreichendes Schmelzverhalten zeigt.

Darüber hinaus zeigt sich in der Praxis, dass die zu Beginn ermittelten Prozessparameter insbesondere unter nahezu konstanten Randbedingungen im Regelfall valide bleiben oder dem finalen Prozessparameter nahekommen. Allerdings führen ebenso prozess- und anlagenspezifische Unsicherheiten – wie schleichender Komponentenverschleiß, geringe Abweichungen in der Systemkalibrierung oder nicht vollständig reproduzierbare Startbedingungen – häufig dazu, dass die tatsächlich erzielten Schicht- und Aufbauhöhen von den erwarteten Sollwerten abweichen. Solche Abweichungen können wiederum einen manuellen Eingriff erforderlich machen, der von einer erneuten Parameteranpassung bis hin zum vollständigen Prozessabbruch reicht. Da der LB-DED-Prozess in der dargestellten Form nicht selbstregelnd arbeitet, kumulieren diese Unsicherheiten besonders in längeren Fertigungssequenzen und können die Prozessstabilität

erheblich beeinträchtigen. Genau an dieser Stelle setzt unser Lösungsansatz an, der eine automatisierte, adaptive und reproduzierbare Prozessführung ermöglicht.

Abbildung 7 zeigt den von uns entwickelten Ansatz zur intermittierenden Höhenausregelung im LB-DED-Prozess, der gezielt die zuvor beschriebenen Unsicherheiten adressiert. Im Gegensatz zum rein manuellen Vorgehen wird der Fertigungsprozess hier durch ein digitales Simulationsmodell ergänzt, das bereits während der a-priori Bahn- und Prozessplanung initial aufgebaut wird. Nach dem Auftragen einiger Lagen erfolgt – anstelle einer manuellen Sichtprüfung – ein automatisierter Scan des Zwischenzustands, dessen Daten aufbereitet und in das Simulationsmodell zurückgeführt werden. Auf Basis dieser realen Messdaten wird der simulierte Höhenverlauf mit dem Sollmodell abgeglichen, sodass Abweichungen in der Schichthöhe, die etwa durch Verschleiß, veränderte Pulverzufuhr oder thermische Drift entstehen, quantifiziert werden können.

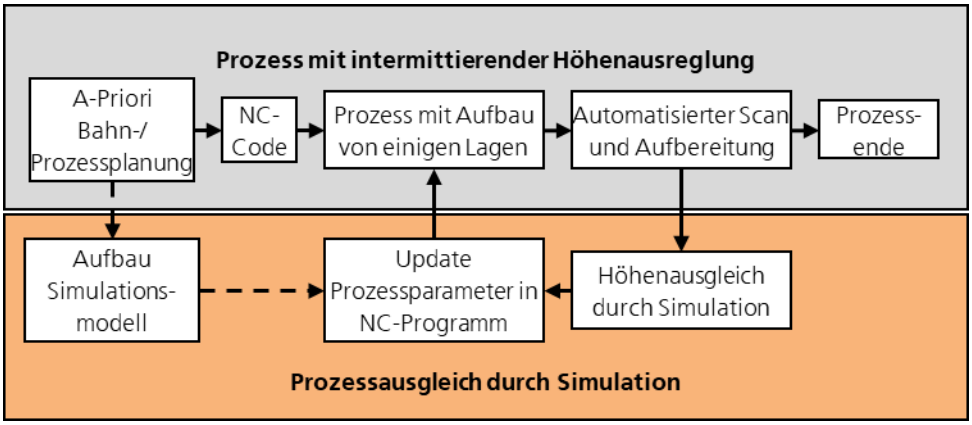

Abbildung 7: Prozess zur Ausregelung der Lagenhöhen beim LB-DED Prozess

Die Simulation berechnet anschließend die notwendigen Höhenausgleichsmaßnahmen und generiert aktualisierte Prozessparameter bzw. NC-Programmanpassungen, die gezielt auf den nächsten Fertigungsabschnitt übertragen werden. Dabei nutzt die Simulation eine Korrekturkurve zur Umwandlung der lokalen Höhenabweichung in eine prozesstechnische Parameteränderung, wobei die Korrekturkurve im Rahmen von AP2 experimentell bestimmt wird. Dadurch wird der Prozess zyklisch korrigiert, bevor größere Abweichungen kumulieren können. Der iterative Regelkreis reduziert manuelle Eingriffe, vermeidet unnötige Prozessabbrüche und erhöht sowohl die Stabilität als auch die Reproduzierbarkeit des LB-DED-Aufbaus erheblich. Somit bietet der Ansatz eine robuste technische Lösung für adaptive, datengetriebene Prozessführung in variierenden Anlagen- und Umgebungsbedingungen.

Für den technischen Höhenausgleich im LB-DED eignen sich insbesondere Parameter, die lokal und dynamisch angepasst werden können, ohne den Prozess zu destabilisieren. Die Laserleistung ist prinzipiell regelbar, weist jedoch aufgrund der internen Leistungsregelung und thermischen Verzögerungen eine deutlich höhere Trägheit und Nichtlinearität auf, denn durch die Veränderung der Leistung wird das Schmelzbad maßgeblich beeinflusst. Deutlich geeigneter ist daher der Vorschub, der – wie in den Vorarbeiten des ProLMD-Projekts gezeigt – schnell und vergleichsweise fein auf Änderungen reagiert und im räumlichen Bereich der lokalen Höhenschwankungen wirksam werden kann, ohne das lokale Schmelzbad stark zu verändern. Die Veränderung des Vorschubs wirkt sich somit deutlich linearer und damit einfacher

regelbar auf eine Anpassung der lokalen Höhe aus. Offene Fragen betreffen insbesondere die Regelgenauigkeit, die erreichbare Dynamik sowie die Einschwingzeit, also wie schnell der Soll-Vorschubwert nach einer Änderung tatsächlich erreicht wird und welche maschinen- bzw. regelungstechnischen Faktoren dies begrenzen.

Tabelle 2: Prozessparameterraum

Laser-leistung	Vorschub-geschwindigkeit	Pulvermassen-strom	Fördergasvolu-menstrom	Schutzgasvolu-menstrom
P_L	v_f	$\dot{m}$	$\dot{V}_C$	$\dot{V}_S$
W	mm/min	g/min	l/min	l/min
500 – 1250	1500 - 2700	8; 10; 12; 14	3,0; 3,5; 4	9; 10; 11

Anschließend erfolgt die Entwicklung des Prozessparameterraums. Im ersten Schritt wird eine Untersuchung der Prozessparameter an Einzelspuren durchgeführt. Durch Variation der Laserleistung, der Vorschubgeschwindigkeit, des Pulvermassenstroms, des Fördergasvolumenstroms und des Schutzgasvolumenstroms lässt sich der Einfluss dieser Parameter auf die Geometrie und Qualität der Schweißnaht systematisch analysieren. Die gewählten Variationsbereiche der Prozessparameter sind in Tabelle 2 dargestellt. Der Laserstrahldurchmesser wird auf 1,6mm festgelegt. Anschließend erfolgt eine optische Inspektion der Draufsicht sowie eine metallografische Untersuchung des Querschliffs. Aufbauend hierauf erfolgt die Untersuchung der geometrischen Variablen der Bahnplanung, der Hatch-Distanz und der Schichthöhe, für den Aufbau von Volumenkörpern. Die Auswahl erfolgt auf Basis der Geometrie der Einzelspuren sowie eines defektfreien Volumenaufbaus, der durch metallografische Untersuchungen der Querschliffe nachgewiesen wird. Hierdurch kann ein Prozessparameterraum identifiziert werden, welcher einen defektfreien Aufbau ermöglicht. Dieser dient als Grundlage für die in AP2 durchzuführende.

Ergebnis

Ein wirtschaftlich relevanter Anwendungsfall, der Turbinenbau, wurde definiert und ein dafür relevantes Material abgeleitet. Defizite. Der dafür veranschlagte Prozessparameterraum wurde aufgestellt und Experimente durchgeführt. Die Ergebnisse können zur Höhenausregelung genutzt werden. Dargestellte Anwendungsfälle wurden analysiert und in einen Anforderungskatalog für modelltechnische Betrachtungen im Simulationsmodell überführt. Ein inhaltlicher Rahmen für den Leitfaden wurde aufgestellt.

2.2 Arbeitspaket 2: Schnittstellen für Regelung, Inbetriebnahme des Demonstrators und Parameterstudien

In diesem Kapitel besprechen wird zunächst die Software- und Hardwaretechnische Lösung zur Implementierung des Gesamtsystems besprochen. Danach wird näher auf die wissenschaftliche Vorgehensweise eingegangen, um experimentell einen Arbeitsraum für unsere technische Lösung zu finden.

Software- und hardwaretechnische Lösung: In Abbildung 8 ist die Systemarchitektur für das Gesamtsystem (vgl. Abbildung 7) dargestellt. Die Komponenten werden vom Projekt-team entwickelt oder von Drittanbietern gestellt. Die Kopplung der Module ist lose und über standardisierte Schnittstellen geregelt. Module sind entsprechend aus-tauschbar (Vgl. Tabelle 3). An den einzelnen Modulen ist notiert, ob dies vom Pro-jektteam oder von einem Drittanbieter implementiert ist.

Zur Umsetzung der A-Priori Bahnplanung bedienen wir uns der Soft-ware OpenARMS der Firma BCT Steuerungs- und DV-Systeme GmbH. Die Software übernimmt auch die Codierung der Bahnvektoren in einen für die Anlage passen-den NC-Code. Schnittstelle 1 ist der NC-Code. Der NC-Code wird an ein speziell entwickeltes Simulationsmodul geschickt, damit in der Simulation ein Modell zum Bauteil aus dem NC-Code erstellt werden kann. Da der NC-Code ebenfalls Technologieinformationen enthält wurde sich an der Stelle für den NC-Code und nicht nur die Bahnvektoren entschieden, um das Simulationsmodell aufzubauen. Damit kann das Simulationsmodell einfach und effektiv erweitert werden, sollten in Zukunft neue Technologieinformationen dazu kommen. Das Simulationsmodul wird weiter in Kapitel 2.3 und 2.4 beschrieben. Der NC-Code wird auch auf die Anlage über-spielt und ausgeführt. Das System ist so konfigurierbar, dass man die Anzahl der durchzuführenden Lagen des additiven Aufbaus mit der Anzahl an intermittieren-den Scans beliebig kombinieren kann (vgl. Abbildung 7). Dem Aufbau folgt der Scan. Ziel soll ein möglichst unterbrechungsfreier und schneller Ablauf zur Auswertung der Höhenausregelung sein. Dazu sind die an das System gesteckten Anforderungen, den Scan direkt von der Anlage aus zu starten und an eine Empfänger-Software an einem externen PC zu übertragen, dort die Höhenkarte gegenüber dem geplanten Aufbau zu vergleichen, einen angepassten Prozess abzuleiten und wieder auf die Anlage zu überspielen, ohne dass der NC-Code unterbrochen werden muss. Die hier genannten Funktionen sind essenzielle Bausteine unserer Lösung und werden im Folgenden mit entsprechenden Verweisen im Schlussbericht verknüpft:

1. Scan von der Anlage aus starten und Daten zurück an einen Empfänger Computer spielen. Scan soll unterbrechungsfrei, also ohne Stop des NC-Programms auf der Anlage gestartet werden. Dazu ist die Funktion ideal-erweise integriert als Befehl in das NC-Programm und ruft eine programmierte Routine auf der Anlage aus. Die dazu benötigten Umsetzungen sind spezifisch für den Anlagentyp und die Steuerungssoftware und wurden in unserem Fall von der Firma BCT Steuerungs- und DV-Systeme GmbH implementiert.

2. Der Scan wird als Punktewolke an das Simulationsmodell geschickt, annotiert mit der Information des aktuellen Lagenindex, welcher an der Anlage prozessiert wird. Die Punktewolke wird in eine digitale Höhenkarte umgewandelt und gegen die entsprechende Lage im digitalen Bauteilmodell verglichen. Der Scan mit dem Lagenindex bildet die Schnittstelle 2.

3. Höhenunterschiede werden lokal an den Bahnvektor des Bauteils berechnet. Detailinformationen bezüglich der Berechnungen sind in Kapitel 2.3 und 2.4 zu finden. Somit gibt die Bahnplanung die laterale Auflösung der Höhenausregelung vor. Die Höhendifferenz wird über einen mathematischen Zusammenhang in einen regelbaren Prozessparameterwert konvertiert. Dieser wird in eine Tabelle einsortiert, zusammen mit der Information des Bahnvektor Index (vgl. Bild 11). Die Tabelle wird an einen Technologie-prozessor überführt und bildet damit die Schnittstelle 3.

4. Der Technologieprozess übernimmt die Aufgabe, die lokalen Prozessparameteranpassungen auf Machbarkeit und Anlagentauglichkeit zu überprüfen. Hier soll überprüft werden, ob der Unterschied zweier, aufeinander-folgenden Bahnvektoren und dessen Prozessparameter keinen zu starken Unterschied zueinander haben. Falls dies eintritt, so werden die Werte geglättet, um die Regelung der Anlage nicht zu überfordern und damit den Prozess zu stören.

5. Die aufbereiteten, tabellarisch vorliegenden Prozessparameter werden von einem speziell entwickelten Programm zur Laufzeit des NC-Programms in fest definierten Abständen auf die Anlage gespielt. Die Tabelle und das Pro-gramm bilden die Schnittstelle 4. Da die Makino Anlage eine von Siemens Sinumerik gesteuerte Anlage ist, wird die verfügbare OPC-UA Schnittstelle genutzt, und Variablen an der Anlage zur Laufzeit manipuliert. Die Variable ist mit dem laufenden NC-Programm verknüpft, sodass zur Laufzeit durch das externe Programm geänderte Werte im NC-Programm registriert werden (Vgl. Abbildung 10, Abbildung 11, Abbildung 12)

6. Wurden die Prozessparameter berechnet und vom Technologieprozessor bearbeitet, so wird das NC-Programm fortgesetzt und Paket für Paket Prozessparameter an die Anlage übertragen. Der genaue Mechanismus wird später im Zusammen-hang mit Abbildung 9 bis Abbildung 12 beschrieben. Das NC-Programm wird so lange fortgesetzt, bis eine neue Unterbrechung durch einen intermittierenden Scan stattfinden. Dies wird so lange wiederholt, bis das Bauteil aufgebaut ist, was mit dem Ende des NC-Programms einhergeht oder der Operator den Vorgang abbricht.

7. Zur Umsetzung der Software- und Hardwaremodule wurde versucht, möglichst auf vorhandene oder kommerziell erhältliche Module zurückzugreifen, um sich in der Projektphase möglichst effizient den technischen Herausforderungen zu stellen. Gleichermaßen sind alle entwickelten oder kommerziell erhältlichen Module aus-tauschbar durch technisch äquivalente Module, daher kann man bei der Umsetzung des Gesamtsystems nicht von einer Abhängigkeit gegenüber einem Dritten sprechen.

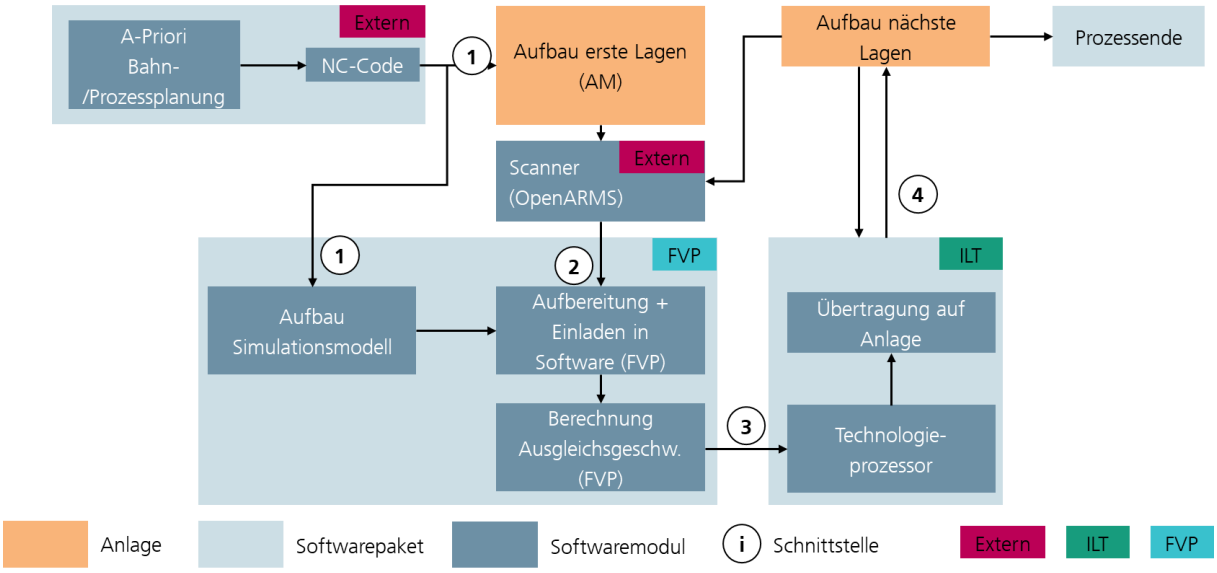

Abbildung 8: Systemarchitektur und Schnittstellen (Anlage–OpenARMS–Laserscanner–OPC-UA/GUDs; Datenfluss inkl. Postprozessor und NC-Code)

Tabelle 3: Schnittstellen zur Übertragung von Bahn- und Technologieinformationen im DED-Prozess. Vergleich auch Abbildung 8.

Schnittstelle	Aufgabe	Standard
1	Prozessplanung inklusive Technologieinformationen und Anlageninformationen	Siemens SINUMERIK G-Code
2	Punktewolke aus 3D-Scan im Koordinatensystem der Bahnplanung / Simulation zum direkten Vergleich	CSV-Tabellenformat
3	Prozessparameter für die nächsten Lagen zur Anpassung des bisherigen Prozessfehlers	CSV-Tabellenformat
4	Übertragung der Prozessparameter in Paketen (vgl. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** und **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**)	OPC-UA

In Abbildung 9 ist die Draufsicht auf ein einfaches 3D-Teil gezeigt. Sie stellt eine Lage des Bauteils dar. Auf dem Bauteil sind Punkte vermerkt, welche die Bahnpunkte dar-stellen, welche dem Aufbau des Bauteils im NC-Code dienen. Die Bahnpunkte sind in einem gleichgroßen Abstand in X und Y eingeteilt und verteilen sich somit über das gesamte Bauteil. Prozessiert die Anlage den NC-Code, so legt die Anlage inner-halb einer einzelnen Bahn flüssiges Pulver entlang einer horizontalen oder vertikalen Bahn und fährt dabei über die diskreten Bahnpunkte. Das Bauteil ist in diskrete Punkte aufgeteilt, sodass an genau diesen Stellen eine Berechnung der lokalen Höhendifferenz durch die Simulation stattfinden kann. Der Abstand der Punkte zueinander reguliert, wie fein man auf Höhendifferenzen regeln kann. Größere Abstände geben weniger Spielraum Höhendifferenzen auszugleichen, stellen für die Anlage jedoch weniger Regelaufwand und Ansprüche an die Dynamik dar. Entsprechend gilt es, im Rahmen des Projektes herauszufinden, wie weit man den Abstand der Punkte zueinander einstellt. Auf der rechten Seite des Bildes sieht man die Punkte in verschiedenen Farben, welche die Punkte in Bereiche einteilen. Die Bereiche spiegeln wider, wo sich das NC-Programm gerade befindet, und welche Information zur Ausregelung der Höhen auf der Anlage synchron vorliegen müssen. An dieser Stelle muss man erklären, dass von Extern nur eine begrenzte Anzahl an Werten im Voraus an die Anlage kommuniziert werden kann (in unserem Fall 3000) und dass von Extern nicht beliebig schnell Werte auf die Anlage gesendet werden kann, um zu kommunizieren, wie auf die lokale Höhendifferenz zu regeln ist. Nehme man an, für ein großes Bauteil sind in einer Lage über 3000 Bahnpunkte, so muss entsprechend mindestens zweimal Werte kommuniziert werden, damit die Anlage alle Werte zur Höhenausregelung zur Laufzeit erfährt. Damit die Anlage das Programm flüssig und mit aktuellen Werten abspielen kann, müssen die Werte in einem passenden zeitlichen Abstand bereits im Voraus kommuniziert werden. Daher muss ein externes Programm (vgl. Abbildung 8 und Abbildung 10) die Werte in regelmäßigen Abständen an die

Anlage kommunizieren. Dabei werden gleich mehrere Werte in einem Bündel an die Anlage kommuniziert, da dies effizienter ist, als jeden Wert einzeln zu senden (Stichwort: Array). Dies ist später in Abbildung 11 und Abbildung 12 näher erklärt. Entsprechend der Größe des Arrays auf der Anlage wird das Array in zwei gleich-große Subbereiche aufgeteilt. Im Voraus, zur Erstellung des NC-Programms wird jedem Bahnbefehl ein Wert im Be-reich des Arrays zugewiesen (z.B. in unserem Fall 3000 Werte unsigned integer 8, kurz: UINT8). Die Einteilung ist völlig dynamisch und hängt maßgeblich von der Anzahl an Bahnpunkten im NC-Programm und der Größe des Arrays auf der Anlage ab. Auf dem Bild sind neben den Farben für die zwei Bereiche auf Start und Ende des Bereiches markiert. Diese haben die besondere Bedeutung, dass zwischen diesen Bahnpunkten im NC-Programm ein Sonderbefehl zur Synchronisation mit dem externen Programm vorgehalten ist und dieser Befehl veranlasst, dass Werte zur Höhenausregelung von dem externen Programm an die Anlage kom-muniziert, wer-den. Geschieht dies, so werden teilweise veraltete Werte überschrieben. Dies ist je-doch in Ordnung, da diese Werte bereits benutzt wurden und das NC-Programm diese Bahnpunkte bereits abgear-beitet hat.

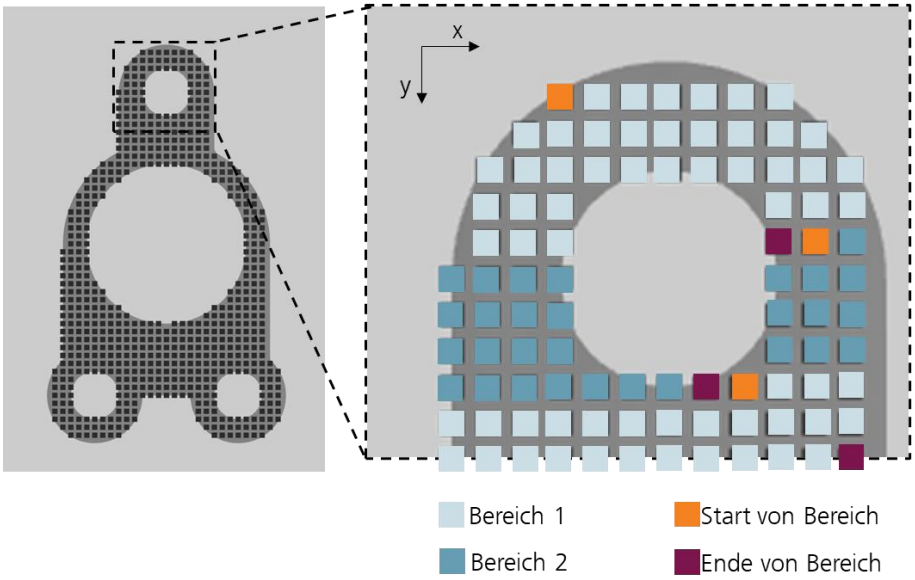

Abbildung 9: Links: Draufsicht einer Lage eines Bauteils sowie Einteilung in Punkte gleichen Abstands. Für jeden Punkt wird lokal die Höhen-differenz bestimmt und Vorschub-änderung bestimmt. Rechts: Zoom-In mit überlager-ter Darstellung zur Synchronisation. Aufteilung in zwei Bereiche dient der Synchronisation über GUD-Variablen. Dazu wird zwischen Endpunkten und Startpunkten eine Synchronisation ausgetauscht. Siehe auch Bild 10.

Wie in Abbildung 10 zu sehen, geschieht die Übertragung der Werte für die Bereiche 1 und 2 immer im Wech-sel zum aktuell genutzten Bereich. Der aktuell genutzte Bereich stellt dabei den Bereich dar, welcher gerade durch die Anlage im NC-Programm verfahren wird. Durch die versetzte Übertragung des jeweils anderen Bereichs kann somit garantiert werden, dass immer genau die Werte für die Höhenausregelung vorliegen und demgegenüber keine Veralteten. Dazu gibt das NC-Programm einen Befehl aus, welcher eine Synchroni-sation triggert (Im Stream „NC-Program“: Grüner Kasten am Ende von Bereich 1 oder 2). Die Synchronisation

setzt ein Bit, auf welches im externen Programm ein OPC-UA Event hört und mitbekommt, dass das Bit gesetzt wurde (Stichwort: Sync-Flag). Das externe Programm schreibt daraufhin den nächsten Bereich auf das Array auf der Anlage, während das NC-Programm ohne Unterbrechung weiterlaufen kann. In diesem Sinne bekommt das NC-Programm gar nicht mit, dass neue Werte kommuniziert werden, da dies im Hinter-grund abläuft. Im Projekt wurde gemessen, wie die Round-Trip-Time (RTT), also die Zeit zwischen externem Programm und Anlage zur reinen Kommunikation ist. Dabei wurde eine mittlere RTT von ca. 800ms gemessen, wenn dabei ein Array von 1500 Werten übertragen wird. Diese Zeit stellt eine zeitliche Anforderung an den Prozess, denn es muss garantiert werden, dass die Abarbeitung eines Bereiches mit 1500 Bahnpunkten länger dauert als 800ms. Da dies jedoch immer garantiert werden kann, ist dies eine technische Lösung für das Problem (Abstand der Bahnpunkte mindestens 1mm, für 1500 Bahnpunkte gelten entsprechend 1500mm, bei 2.000mm/min Vorschub sind das 45 Sekunden).

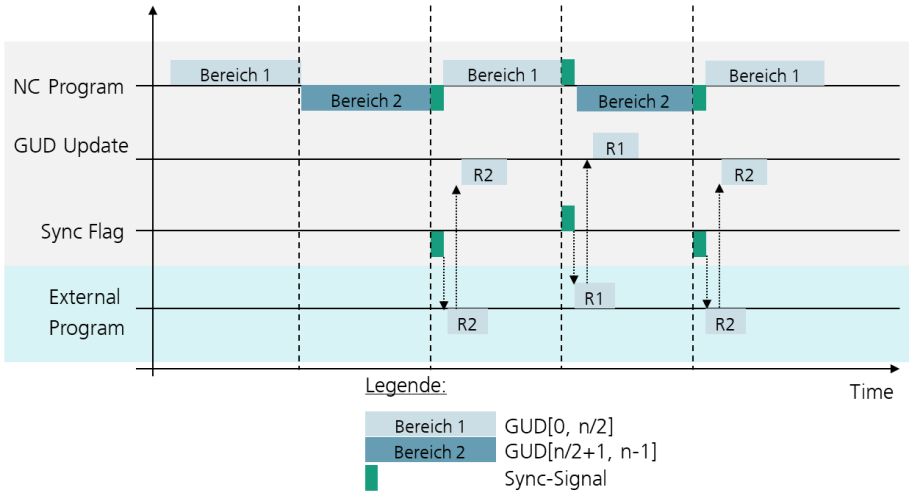

Bild 10: Übermittlung der Geschwindigkeits-parameter zwischen einem externen Programm und dem auf der NC-Steuerung laufenden Programm (NC-Program). Das NC-Programm sendet zur Laufzeit Synchronisations-signale (Sync Flag), wodurch das externe Programm über OPC-UA Kommunikation die GUD-Variable aktualisiert. Siehe dazu Bild 9

In Abbildung 11 und Abbildung 12 ist dargestellt, wie die Werte zur Höhenausregelung im Detail zusammenhängen. Ein Wert, welcher vom externen Programm kommuniziert wird, wird an eine vordefinierte Stelle im Array der Anlage geschrieben, da dies vorab bereits im NC-Programm festgelegt wurde. Wie in Bild 12 zu sehen, verweist jede Zeile im NC-Programm entsprechend auf eine exakte, vorher festgelegte Stelle im Array.

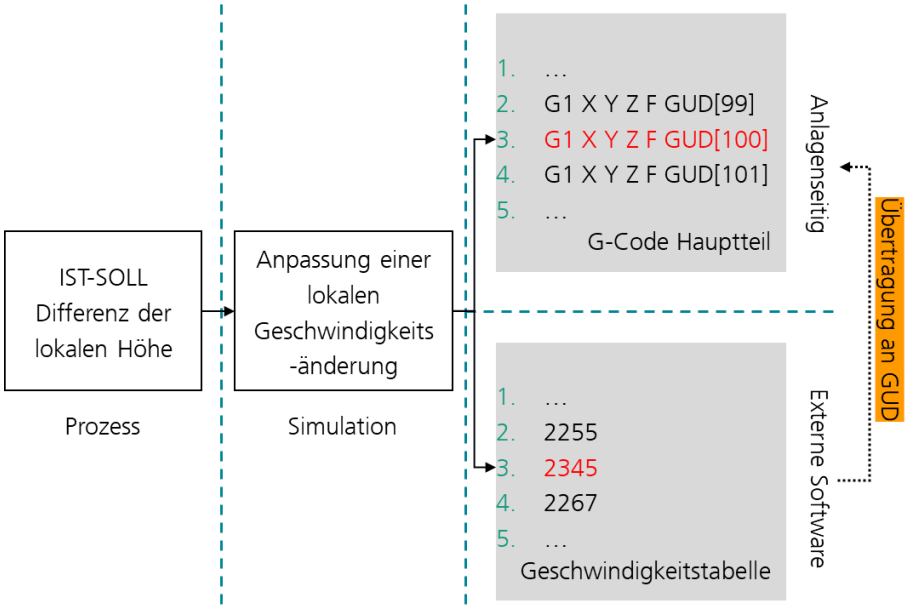

Bild 11: Prozessablauf für den Ausgleich von Höhen-differenzen durch dynamische Anpassung der Vorschub-geschwindigkeit.

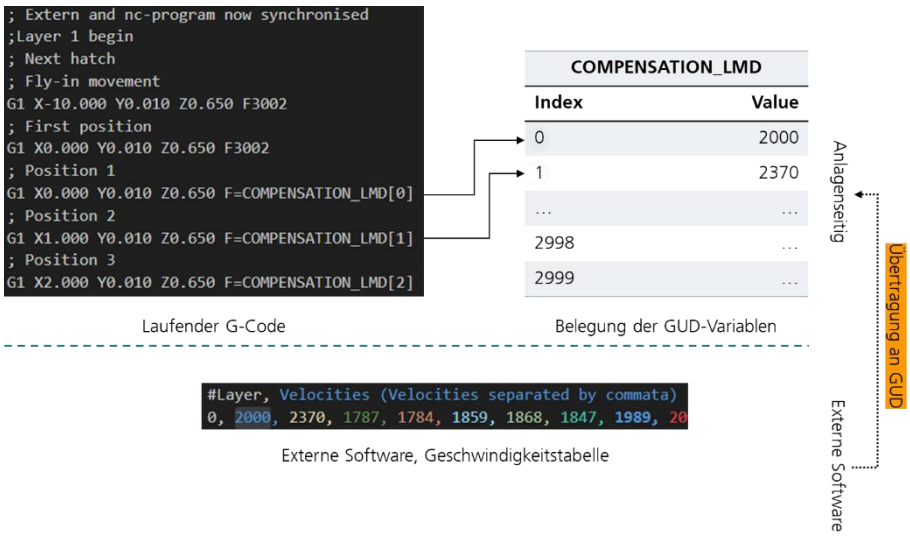

Abbildung 12: Wie Abbildung 11, jedoch mit echten Daten. Eine externe Soft-ware kommuniziert über OPC-UA mit der Anlage und meldet synchronisiert Daten an eine öffentlich erreichbare GUD-Variable. Die GUD-Variable ist ein Array der Größe 3000. Es findet über den G-Code und das externe Programm eine Absprache statt, wann die Geschwindigkeiten in der GUD-Variable ersetzt werden müssen

Die in Abbildung 8 beschriebene Software, im Detail der Technologie Prozessor und das Werkzeug zur Übertragung der Werte an sind in der Programmiersprache Python geschrieben, welche sich für die Prototypenerstellung eignet und viele Werkzeuge und Funktionen in Form von Open-Source Bibliotheken zur Verfügung stellt. Die Software zur Simulation der Höhenausregelung ist weiter in Kapiteln 2.3 und 2.4 beschrieben. Die von Drittanbieter zur Verfügung gestellte Software OpenARMS ist ein proprietäres Werkzeug und kann von

der Firma BCT Steuerungs- und DV-Systeme GmbH angefragt werden. Die auf der Anlage laufende Steuerungssoftware ist von der Siemens AG. Der Demonstrator ist in Abbildung 13 zu sehen. Der externe PC ist über ein Ethernet Kabel mit der MAKINO Anlage verbunden, sodass die Siemens Steuerung mit dem externen PC kommunizieren kann.

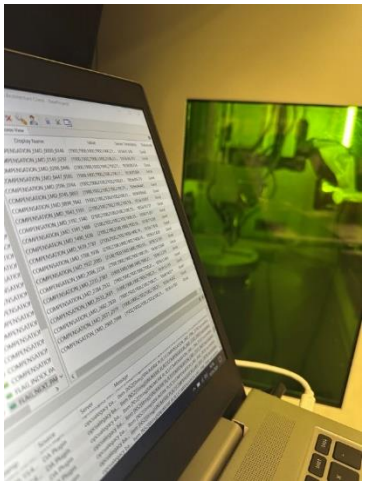

Abbildung 13: Demonstrator mit externem PC und laufender Soft-ware zur Übertragung der GUD-Werte im Vordergrund und MAKINO Anlage mit Prozesskopf hinter Laserschutzglas (grün) im Hintergrund.

Wissenschaft und experimentelle Vorgehensweise

AP2 hat den Demonstrator inklusive Software und hardwareseitiger Implementierung und die Software zur Erzeugung belastbarer Geometriedaten aufgebaut und die technische Kopplung der Projektanlage mit der CAM-Planungssoftware OpenARMS und dem Laserlinienscanner realisiert. In Kooperation mit BCT wurde ein Postprozessor entwickelt, der die in OpenARMS berechnete Bahnplanung in maschinenspezifischen NC-Code übersetzt. Damit sind die direkte Ansteuerung des Laserlinienscanners, der Datentransfer zum Auftragssimulationsmodell sowie die Übertragung geometrisch und technologisch angepasster Bahndaten an die NC-Steuerung möglich. Hierdurch entfällt die manuelle Ausrichtung der Messdaten des Laserlinien-Scanners an die Bahnplanung, da die Messergebnisse direkt in verschiedene Koordinatensysteme umgerechnet werden können.

Aus dem in AP1 definierten Parameterraum wurde anhand von Porosität, Rissfreiheit und Geometriemaßen ein geeigneter Parametersatz ausgewählt. Anschließend wurden die Geschwindigkeitsbereiche bestimmt, in denen bei konstanten übrigen Parametern eine fehlerfreie volumetrische additive Auftragung möglich ist; alle untersuchten Geschwindigkeiten zeigten eine Porosität < 0,05 % und sind damit prozesstauglich.

Darauf basierend wurde eine Kompensationskurve erstellt, die die aufgetragene Materialmenge mit der Prozessgeschwindigkeit verknüpft. Für die Untersuchung der Wechselwirkungen aus Prozess- und Bahnplanungsparameter erfolgt zunächst der grundsätzliche Nachweis, dass die Prozessgeschwindigkeit als Parameter zur Höhenausreglung verwendet werden. Die Analyse einzelner Bahnen ergab eindeutig: Mit steigender

relativer Prozessgeschwindigkeit nimmt das Materialvolumen ab. Im Anschluss wird die Übertragbarkeit dieses Zusammenhangs auf den zweidimensionalen Raum nachgewiesen.

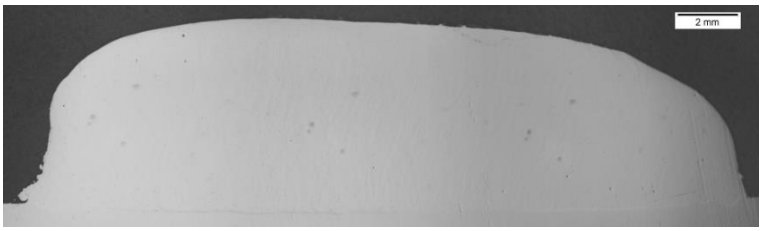

Bild 14: Querschliff LMD-Probe (Porosität < 0,05 %)

Hierfür wurde in der ersten Lage durch ein variables Geschwindigkeitsprofil ein zweidimensionales Höhenprofil mit einer Auflösung von 10 mm mal 10 mm aufgebaut. Anschließend wird dieses Geschwindigkeitsprofil in Lage 2 mit der theoretisch komplementären Geschwindigkeit an der Basisgeschwindigkeit (v_Basis=2000 mm/min) invertiert. Das bedeutet beispielsweise, dass wenn in Lage 1 für einen Bereich die Vorschubgeschwindigkeit v_Lage1=1800 mm/min verwendet wird, dass in Lage 2 für den gleichen Bereich die Vorschubgeschwindigkeit v_Lage2=2200 mm/min angewendet wird. Formel 2.1 zeigt die allgemeine Berechnungsformel 2.1:

$$v_{Lage2} = 2 * v_{Basis} - v_{Lage1}$$

Als Kontrollversuch wird hierzu parallel auf das gleiche Geschwindigkeitsprofil in Lage 1 in Lage 2 keine Anpassung der Vorschubgeschwindigkeit vorgenommen, sondern für die gesamte Lage 2 der Basiswert (v_Basis=2000 mm/min) für die Vorschubgeschwindigkeit verwendet. Die Ergebnisse dieser Versuchsreihe ist beispielhaft in Abbildung 15 anhand einer zweidimensionalen Höhenmessung dargestellt.

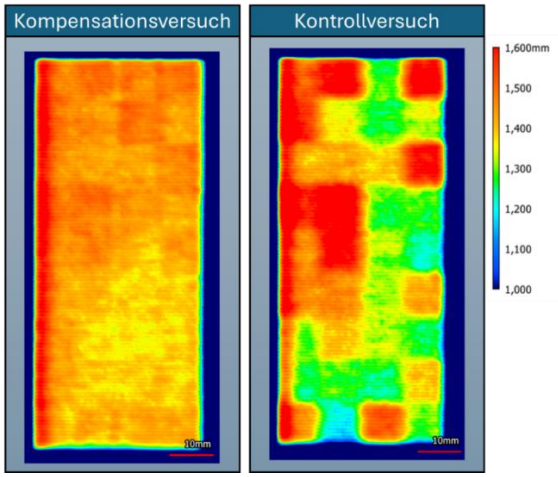

Bild 15: Wechselwirkung von Vorschubgeschwindigkeit und Aufbau-höhe
mit Kompensation (links) und ohne Kompensation / Kontrollversuch (rechts)

Die Höhenmessung in Abbildung 15 zeigt, dass Höhenabweichungen durch Anpassung der Vorschubgeschwindigkeit kompensiert werden können. Zudem führt die Ver-wendung der theoretisch komplementären

Geschwindigkeit zu einem gleichmäßigeren Höhenprofil. Trotz der Kompensation sind im Kompensationsversuch (links) in Lage 2 weiterhin kleinere Abweichungen im zweidimensionalen Höhenprofil messbar. Die Aufbauhöhe wird nicht nur durch die Vorschubgeschwindigkeit beeinflusst, sondern unterliegt einem multifaktoriellen Einfluss, beispielsweise auch durch den Arbeitsabstand, also dem Abstand zwischen der Spitze der Pulverdüse und der Bearbeitungsfläche. Ursache hierfür ist der definierte Fokuspunkt der Pulverdüse. Wird dieser nicht exakt getroffen, verändert sich der Pulverwirkungsgrad, wodurch sich die aufgetragene Materialmenge und somit die Aufbauhöhe ändern. Der Einfluss der Abweichung vom Soll-Arbeitsabstand auf den Aufbauhöhe ist in Abbildung 16 dargestellt.

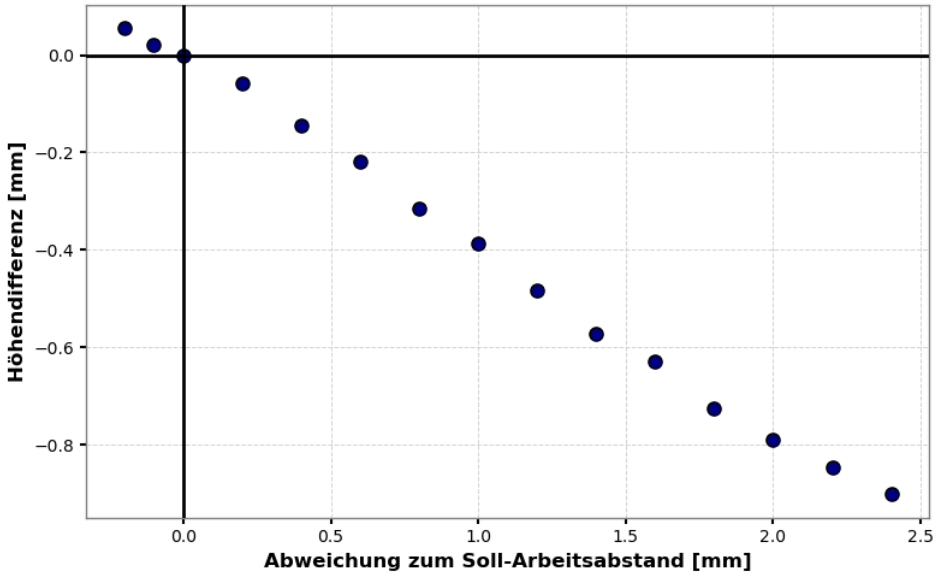

Abbildung 16: Einfluss der Abweichung zum Soll-Arbeitsabstand auf den Aufbauhöhe

Zur Bestimmung des Zusammenhangs zwischen Höhenabweichung und notwendiger ausgleichender Geschwindigkeit wird eine weitere Versuchsreihe zur experimentellen Verifizierung der Kompensationskurve für planare Fehler durchgeführt. Dazu wird zunächst eine Ebene mit gezielt erzeugten topografischen Abweichungen aufgebaut: drei vertikale Segmente, außen mit identischer Prozessgeschwindigkeit, innen mit abweichender Geschwindigkeit zur systematischen Erzeugung von Hügeln/Tälern. In einer zweiten, ausgleichenden Ebene wurde das innere Segment horizontal in fünf Bereiche unterteilt. Die Außensegmente liefen mit Referenzgeschwindigkeit, die inneren Bereiche mit der theoretisch komplementären Geschwindigkeit zur ersten Ebene (vgl. Formel 2.1) sowie ±5 %-Abstufungen und ±10 %-Abstufungen. Dies zeigt Abbildung 17.

Die Höhenprofile wurden nach Lage 1und Lage 2 mittels optischem Profilometer vermessen. Für jeden Bereich wird der Median des Höhenwert berechnet, der alle Messpunkte innerhalb dieses Bereichs berücksichtigt. Durch den Vergleich der Höhenmediane der fünf mittleren Bereiche, mit denen der Randsegmente kann, der zuvor gemessenen Höhenabweichung in Lage 1 eine entsprechende ausgleichende Vorschubgeschwindigkeit zugeordnet werden. Das Vorgehen wird für mit verschieden Vorschubgeschwindigkeiten für die

mittlere vertikale Bahn in Lage 1 durchgeführt, sodass verschiedenen Höhendifferenz eine Ausgleichsgeschwindigkeit eindeutig zugeordnet werden kann. Anschließend wird zur kontinuierlichen Berechnung eine Polynomfunktion dritten Grades an die Messwerte angepasst. Diese ist in Abbildung 18 dargestellt.

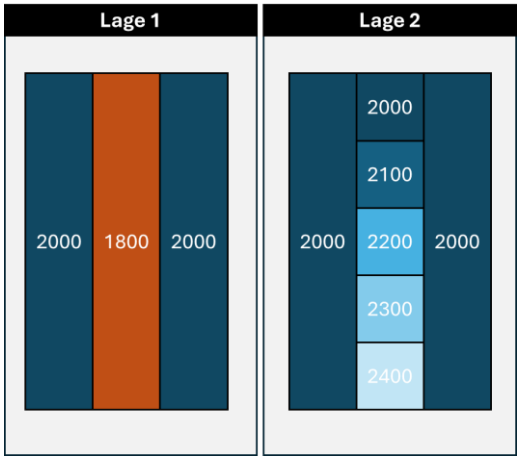

Abbildung 17: Beispiel experimentellen Verifizierung der Kompensationskurve

Abschließend wird beim additiven Aufbau nach jeder Schicht Höhenprofile mittels Laserlinienscanner erfasst. Diese Zwischengeometrien dienen als Versuchsdaten zur Kalibrierung der geometrischen Simulation. Über einen OPC-UA-Server wurden die globalen Anwendervariablen (GUDs) der Anlage zugänglich gemacht und im NC-Code punktweise mit der Prozessgeschwindigkeit verknüpft, wodurch eine Online-Anpassung während des laufenden Prozesses möglich ist. Dazu wurde innerhalb dieses Kapitels detailliert zu Beginn des Kapitels berichtet. Durch diese Arbeiten liegen ausreichend Geometriedaten vor, um die Kopplung zwischen Simulationsmodell und Werkzeugbahnplanung zu unterstützen. Die Prozesskette kann simulativ durchgespielt werden.

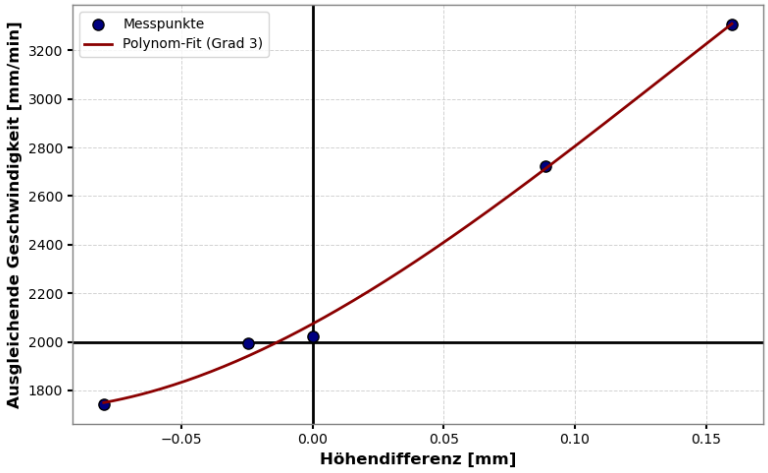

Abbildung 18: Kompensationskurve

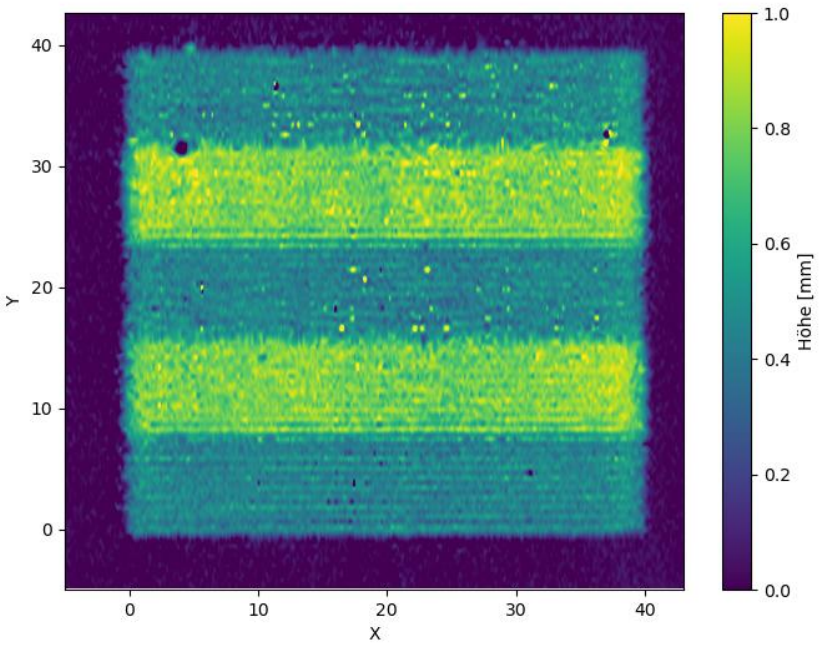

Abbildung 19: Beispiel-Höhenprofile einzelner Schichten aus dem Laserlinien-scanner (Heatmaps)

Ergebnis

Nach Abschluss von AP 2 sind Demonstrator und Software für das Projekt vorbereitet. Zudem sind genügend Geometriedaten aus Versuchen vorhanden, um die Kopplung zwischen Simulationsmodell und Werkzeug-bahnplanung zu unterstützen (AP 5) und anhand erhobener Daten die Prozesskette simulativ durchzuspielen.

2.3 Arbeitspaket 3: Modellbildung zur geometrischen Simulation

In Arbeitspaket 4 galt es, auf Basis eines Dexel-Modells ein echtzeitfähiges „3D-Simulationsvideo-Konzept“ zu erstellen, welches den simulierten Materialauftrag bahnabschnitts- bzw. lagenweise darstellen kann und gleichzeitig die Verbindung zwischen zuletzt vorliegender Bauteiloberfläche, aktuell hinzukommender Bauteiloberfläche und den jeweils erzeugenden Bahnbereichen liefert.

Technisch umgesetzt wurde das 3D-Simulationsvideo mittels eines ursprünglich für Zerspansimulation entwickelten 3-Dexel-Modells. Das Modell wurde hierzu um die Fähigkeit, auch Materialaufträge abbilden zu können, erweitert. Abbildung 20 vermittelt einen Eindruck der entstandenen Materialauftragssimulation für das Auftragen von zwei Schichten.

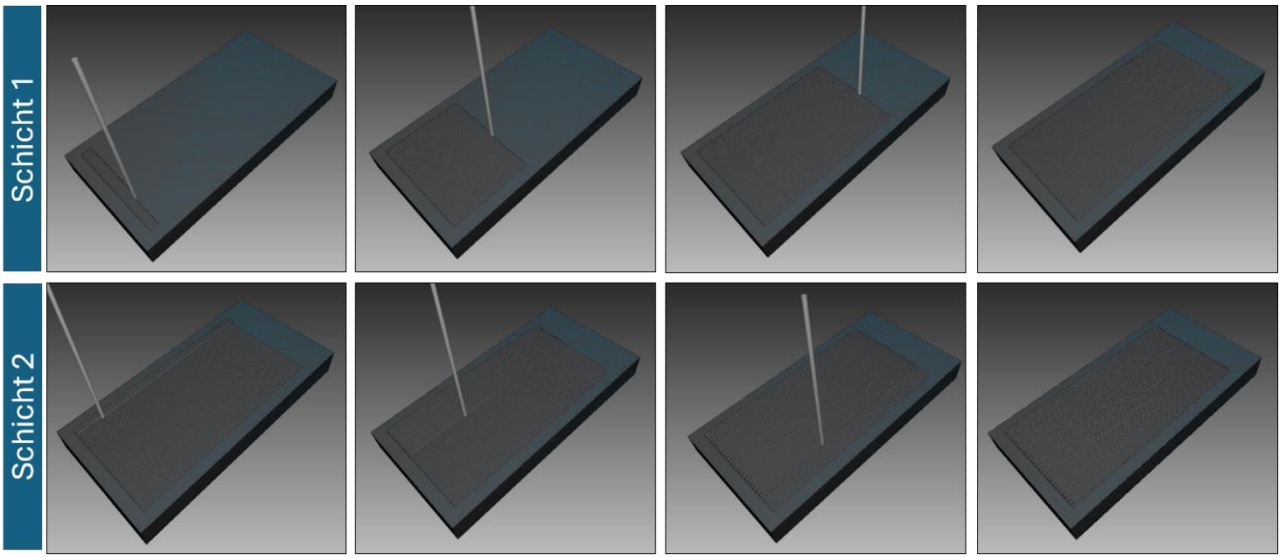

Abbildung 20: GPU-basierte Bearbeitungssimulation zur Abbildung des Materialauftrags

Die Simulation kann vollständig auf einer GPU ausgeführt werden und ist hierdurch abhängig von der eingesetzten Grafikkarte grafisch-interaktiv oder sogar in Echtzeit nutzbar. Die Geometrien, die in jedem Simulationsschritt aufgetragen werden können, müssen konvex sein und reichen von Kugeln über Ellipsoiden bis hin zu Zylindern. Für die Simulation im Rahmen von SimuControl wurden im Wesentlichen Kugeln und Zylinder eingesetzt.

Die Simulation operiert auf Grundlage eines zuvor generierten NC-Programms und berechnet hieraus zeitlich getaktete Zwischenpositionen, die in jedem Simulationsschritt sukzessiv zur Positionierung der hinzuzufügenden Geometrie genutzt werden. Während des Materialauftrags werden auf der neu erstellten Oberfläche Referenzen zum aktuellen Simulationsschritt sowie zum ausgeführten NC-Satz hinterlegt. Gleichzeitig werden die Referenzen der alten Oberfläche genutzt, um Beziehungen zwischen aktuellem Simulationsschritt und letztem Simulationsschritt herzustellen. Hierdurch entstehen Beziehungen zwischen fehlerursächlichen Sätzen des NC-Programms und künftig für die Korrektur geeigneten NC-Sätzen.

Ergebnis

Nach Abschluss von AP 3 lässt sich anhand industriell verbreiteter CAM-Planungsdaten ein Materialauftrag auf Basis eines Dexel-Modells simulieren.

2.4 Arbeitspaket 4: Kopplung Simulation und Werkzeugbahnplanung

Hierzu wurde die Simulation in Arbeitspaket 4 um Funktionen zur Abtastung der Werkstückoberfläche erweitert. Hierdurch wird es möglich, den Soll-Zustand der Planung aufzunehmen und einer gemessenen Ist-Zustand gegenüberzustellen. Technisch werden hierzu die Messergebnisse einer intermittierenden Messung innerhalb der Anlage herangezogen. In einem Vorverarbeitungsschritt werden die Ist-Werte durch eine Bounding Box gefiltert, sodass nur Werte innerhalb des Auftragsbereichs für den Vergleich genutzt werden. Auf eine vorherige Koordinatentransformation zur Ausrichtung von Messwerten und Auftragsmodell konnte verzichtet werden, da Messpunkte der Anlage wie auch im NC-Programm im Werkstückkoordinatensystem der Planung ausgegeben werden. Einen Eindruck der Messwert-Ausrichtung und -Filterung vermittelt Abbildung 22.

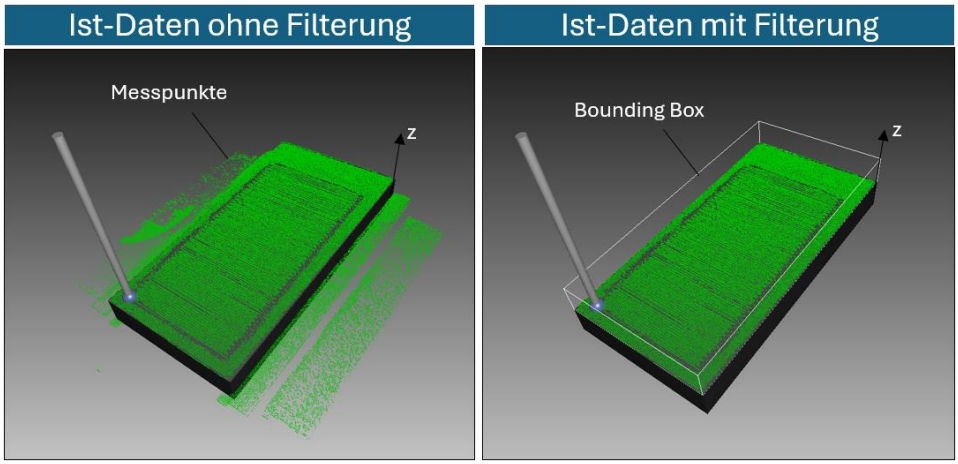

Abbildung 21: Ausrichtung und Filterung von Messdaten

Die Ist-Daten können anschließend in Z-Richtung auf die Werkstückoberfläche projiziert und zur sukzessiven Abtastung des Werkstücks verwendet werden. Hierbei werden die Soll-Höhen des Werkstücks in seinem aktuellen Zustand, d.h. der aktuellen Schicht, ermittelt. Einen Eindruck der sukzessiven Abtastung vermittelt Abbildung 22.

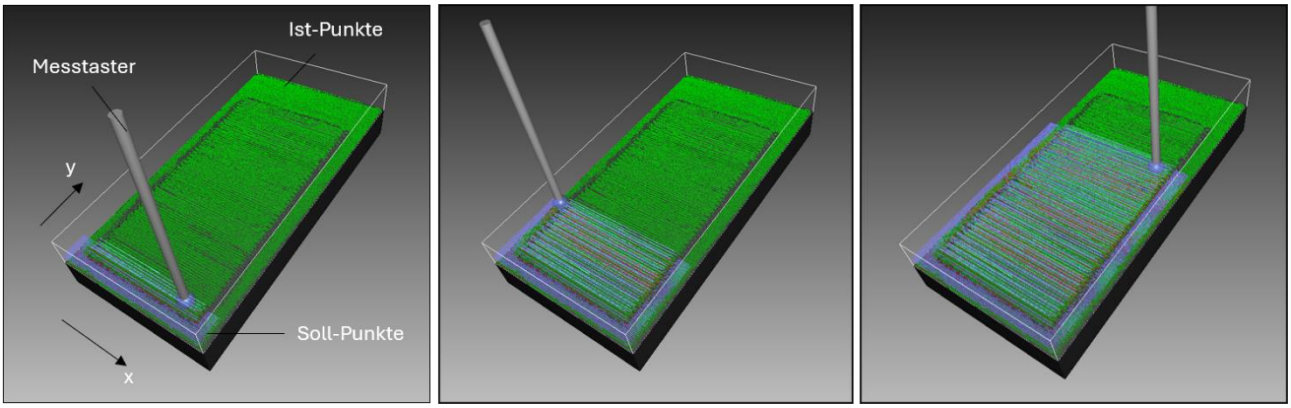

Abbildung 22: Aufnahme von Soll-Mespunkten auf Basis der gefilterten Ist-Messpunkte

Im Anschluss an die Messdatenerhebung lassen sich Soll-Ist-Abgleiche zwischen realem und virtuellen Bauteil durchführen. Hierzu wird zunächst die Bounding Box der Vorfilterung in X-Y-Ebene durch ein benutzerdefiniertes Gitter in uniforme Quader eingeteilt. In jedem Quader werden die enthaltenen Soll- und Ist-Messpunkte für einen lokalen Vergleich der Z-Werte genutzt. Die ermittelten Deltas werden hierbei im entsprechenden Quader hinterlegt. Weiterhin werden dort die zur Korrektur heranzuziehenden NC-Sätze abgelegt. Diese entstammen den Referenzen der jeweils abgetasteten Bauteiloberfläche.

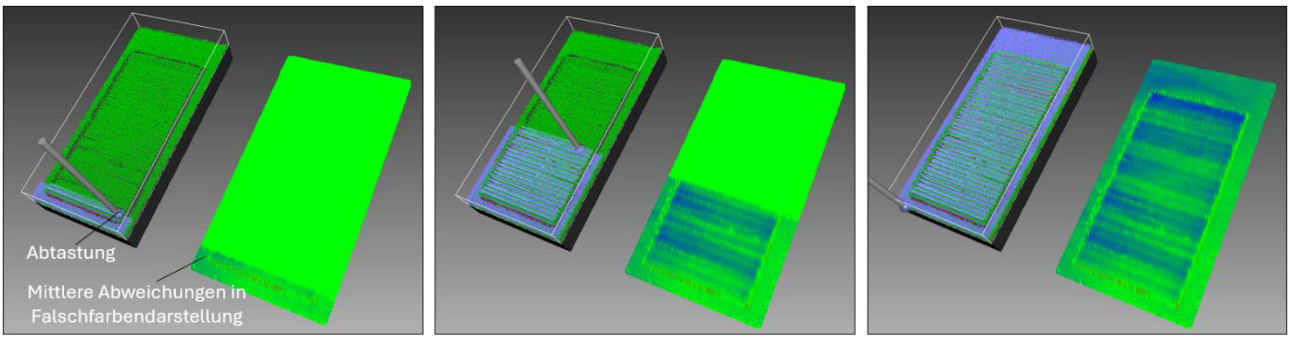

Abbildung 23: Ermittlung und Darstellung der mittleren Abweichungen durch Falschfarben

Abschließend wird für jeden Quader eine mittlere Abweichung berechnet. Abbildung 23 zeigt ein exemplarisches Ergebnis des Abgleichs. Zur Darstellung der mittleren Abweichung werden Falschfarben verwendet. Rot kennzeichnet dabei eine zu geringe Höhe des Ist-Werkstücks gegenüber dem Soll-Werkstück. Blau kennzeichnet eine zu hohe Höhe des Ist-Werkstücks gegenüber dem Soll-Werkstück. Grün kennzeichnet eine Entsprechung.

Die mittleren Abweichungen können anschließend genutzt werden, um anhand des in AP 2 entwickelten Kompensationskurve einen angepassten Bahnvorschub für Geometrie- zu berechnen. Dieser wird dann NC-Sätzen der nächsten Bauteilschicht zugewiesen. Das gesamte Vorgehen ist wie folgt in 5 Schritte unterteilt:

1. Das aktuelle NC-Programm wird für eine Messung per M-Befehl gestoppt
2. Das virtuelle Werkstück wird bzgl. der aktuellen Schicht aktualisiert.

3. Die Messdaten werden für die Abtastung und den Soll-Ist-Abgleich verwendet.
4. Für jeden Quader wird ein mittlerer Vorschub entsprechend der Kompensationskurve ermittelt
5. Für jeden Quader wird anhand der enthaltenen Referenzen die Menge relevanter NC-Sätze identifiziert.
6. Durchstreift ein NC-Satz mehrere Quader, wird er an der Quadergrenze aufgeteilt.
7. Dem auf den Quader entfallenen NC-Satzteil wird der neue Vorschub gemäß Kompensationskurve zugeordnet.
8. Ein aktualisiertes NC-Programm mit den neuen Vorschüben wird erstellt und in die NC-Steuerung übernommen.
9. Das aktualisierte NC-Programm wird an der aktuellen Stelle des alten ausgeführten Programms fortgeführt.

Das wiederholte, ggf. schichtweise Durchlaufen des Ablaufs führt dann zu einer Kompensation geometrischer Abweichungen. Eine Validierung des Vorgehens ist Bestandteil von Arbeitspaket 6.

Ergebnis

Nach Abschluss AP 4 existiert ein neuartiges 3D-Simulationsvideoformat zur bahnbereichs- bzw. lagenweisen Darstellung von Materialaufträgen. Gleichzeitig extistieren hierin Verknüpfungen zwischen alten und neuen Oberflächen sowie den jeweils erzeugenden Bahnbereichen. So ist es möglich, von aktuellen Geometriefehlern auf die für die Korrektur in Frage kommenden Bahnbereiche zu schließen. Durch Vorschubanpassungen lässt sich zudem ein aktualisiertes NC-Programm zur Kompensation geometrischer Abweichungen einer aktuellen Schicht erzeugen.

2.5 Arbeitspaket 5: Befähigung von geometrischer Modelladaption, modellbasierte lagenweise Steuerungsanpassung und automatische Analyse und Beurteilung Prozessergebnis

Zur konkreten Anpassung der A-Priori Bahnplanung wurde ein Softwaremodul (Postprozessor) entwickelt, welches die geometrische Bahnabweichung der aktuellen Lage in eine technologische Anpassung der Bahn der darauffolgenden Lage übersetzen kann. Eine geometrische Flächenprojektion dient dabei der Identifizierung der geeignetsten Prozessparameterkombination sowie des sinnvollsten Bahnnachbarn der nächsten Lage. Dieses Softwaremodul wurde bereits in den vorangegangenen Kapiteln vorgestellt.

Um eine lokale, relative Höhenabweichung in eine technologische Prozessänderung zu übersetzen, werden stabile Prozessparameterräume identifiziert, welche mit der Dynamik des Prozesses kompatibel sind (bspw. Vorschubgeschwindigkeit, Laser-leistung). Für die geplante Anwendung wurde die prozessseitige Auflösungsgrenze des Regelgitternetzes bestimmt. Ein definierter Fehler wurde mit unterschiedlichen räumlichen Auflösungen (1–10 mm) aufgebaut und in einer zweiten Ebene mithilfe der theoretisch komplementären Geschwindigkeit kompensiert. Profilometer-Messungen in Abbildung 24 zeigen, dass im verwendeten Prozessparameterraum Auflösungen von unter 3 mm zu keiner Verbesserung der Kompensation führen. Zur ergänzenden Datenerfassung wurden jeweils vor und nach dem Auftragen jeder Ebene die Höhenprofile zusätzlich mit dem eingebauten Laserlinienscanner aufgenommen. Hierbei konnten keine relevanten Unterschiede festgestellt werden, so-dass die Messgenauigkeit des LLS für den Anwendungsfall ausreichen ist.

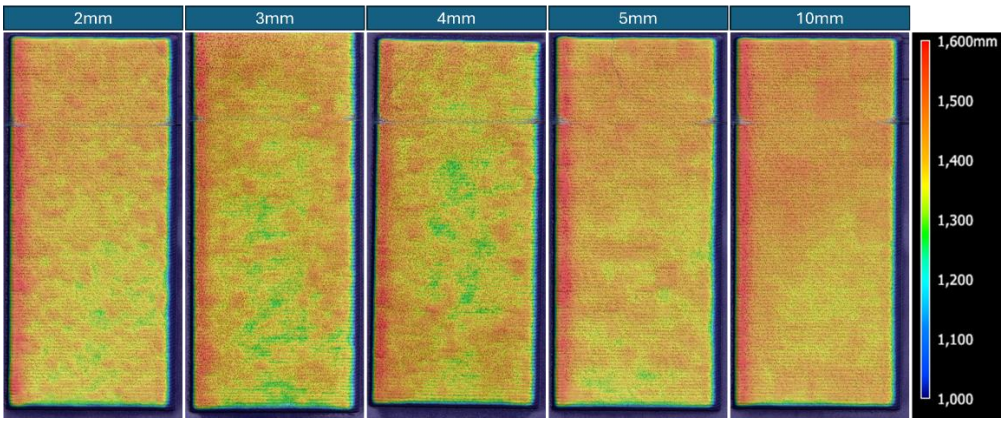

Abbildung 24: Profilometer-Messung von additiven Lagen mit unter-schiedlichen räumlichen Auflösungen (1–10 mm)

Außerdem wurde die Dynamik der Anlage überprüft, um zu verifizieren, wie schnell die Achsen auf eine Bewegungsänderung reagieren können. Hierfür wurden verschiedene anwendungsnahe Geschwindigkeitsprofile abgefahren, und die IST-Geschwindigkeit im IPO-Takt der Anlage (4 ms) aufgezeichnet. Als Segmentlänge für Strecken mit gleicher SOLL-Geschwindigkeit wurde 1 mm gewählt. Ein beispielhafter SOLL-IST-Geschwindigkeitsvergleich ist in Abbildung 25 dargestellt. Das Diagramm zeigt, dass alle vorgegeben SOLL-Geschwindigkeiten in der jeweiligen Segmentmitte erreicht werden. Besonders geringe bis mittlere SOLL-

Geschwindigkeitsänderung können mit minimaler Abweichung von der geforderten Sprungfunktion abgefahren werden.

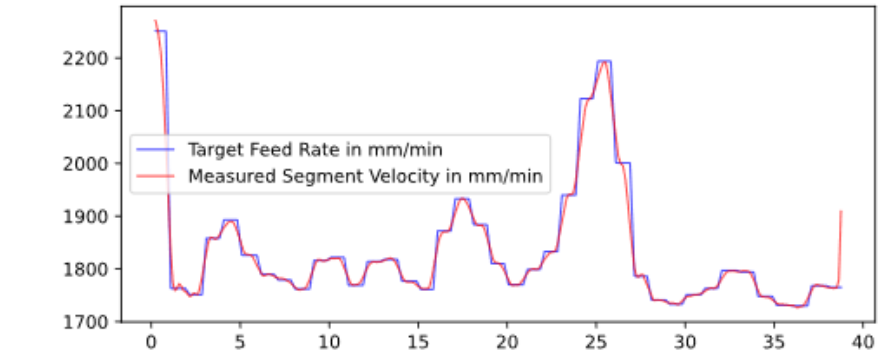

Abbildung 25: Beispielhafte Messung eines vorgegebenen Geschwindigkeitsprofils mit diskreter Geschwindigkeitsvorgabe je 1 mm Verfahrweg bei einem Verfahrweg von 40 mm. Im Rahmen der Messung verfährt die Anlage nur in Richtung x-Achse. Der Wert der y-Achse bleibt konstant.

Für die quantitative Auswertung der SOLL- und IST-Geschwindigkeiten zeigt Abbildung 26 die relative Abweichung der IST-Geschwindigkeit von der SOLL-Segmentgeschwindigkeit über den Verlauf eines Segments für alle 1-mm-Lagensegmente einer Lage eines Würfels der Größe 40 mm x 40 mm. Die durch-schnittliche relative Geschwindigkeitsabweichung beträgt über die Gesamte Segmentlänge unter ±0.5 %. Die erhöhte Standardabweichung zu Beginn und am Ende eines Segments ist darauf zurückzuführen, dass sich der Bezugswert (SOLL-Geschwindigkeit) während der Beschleunigungs- und Bremsphasen im Segmentübergang ändert. Daher wirken die angrenzenden Segmente auf die IST-Geschwindigkeit ein, was die Abweichungen zusätzlich beeinflusst.

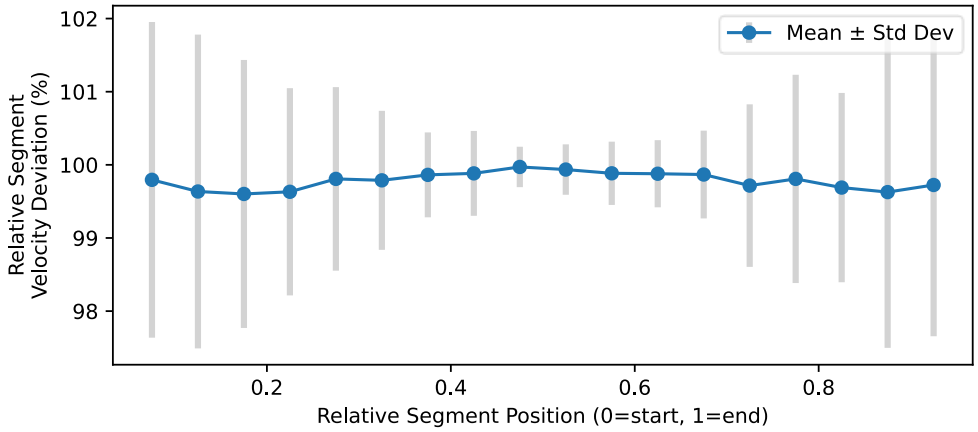

Abbildung 26: Relative Abweichung der IST-Geschwindigkeit von der SOLL-Segmentgeschwindigkeit über den Verlauf eines Segments für alle 1-mm-Lagensegmente einer Lage eines Würfels der Größe 40 mm x 40 mm

Anschließend wurde in einem Experiment ein Würfel der Größe 40 mm x 40 mm aufgebaut wie in Bild 23 zu sehen. In der ersten Lage wurde ein Fehler eingebaut, indem zwei verschiedene Geschwindigkeitsprofile

gefahren wurden (2800 mm/min und 1600 mm/min). Die restlichen Lagen wurden über das System ausgeregelt, in-dem wie in Abbildung 8 dargestellt Lage für Lage eine Ausregelung berechnet und in das NC-Programm gespielt wurde. Wie in Lage 2 zu sehen, laufen die Geschwindig-keitsprofile genau gegenteilig zu denen in Lage 1. Weiter in Lage 3 bis 5 sind die festgestellten Unterschiede zwischen den zwei provozierten Höhen immer geringer, bis die Geschwindigkeiten in Lage 5 nahezu identische Geschwindigkeiten über die ganze Lage hinweg haben. In Abbildung 27 auf der linken Seite ist dafür das Geschwindigkeitsprofil als Heatmap dargestellt. Auf der rechten Seite ist für jedes 1 mm Seg-ment die Abweichung zwischen IST und SOLL-Geschwindigkeit zu sehen. Während auf der makroskopischen Ebene, also den Heatmaps, die Höhen ausgeregelt wer-den, sieht man auf der mikroskopischen Ebene, also den 1 mm Segmenten, dass es immer wieder stärkere Abweichungen zwischen den Segmenten gibt und innerhalb des Segmentes stärker ausgeregelt werden muss. Abbildung 28 verdeutlicht diesen Zusammenhang. Während die Ausregelung sich von Lage 3 bis 5 leicht stabilisiert, was an der reduzierten Standardabweichung in der Abweichung zwischen IST und SOLL-Geschwindigkeit zu sehen ist, verringert sich der Durchschnitt der IST-Geschwindigkeit pro Lage. Ab Lage 3 fällt der Wert von 2156 mm/min auf 1830 mm/min. Dies verdeutlicht, dass es eine Diskrepanz zwischen der in Kapitel 2.2 er-rechneten Kompensationskurve und dem hier gemachten Experiment besteht und die Kurve für dieses Experiment nicht vollständig den Zusammenhang zwischen Prozess und dem entwickelten System reflektiert.

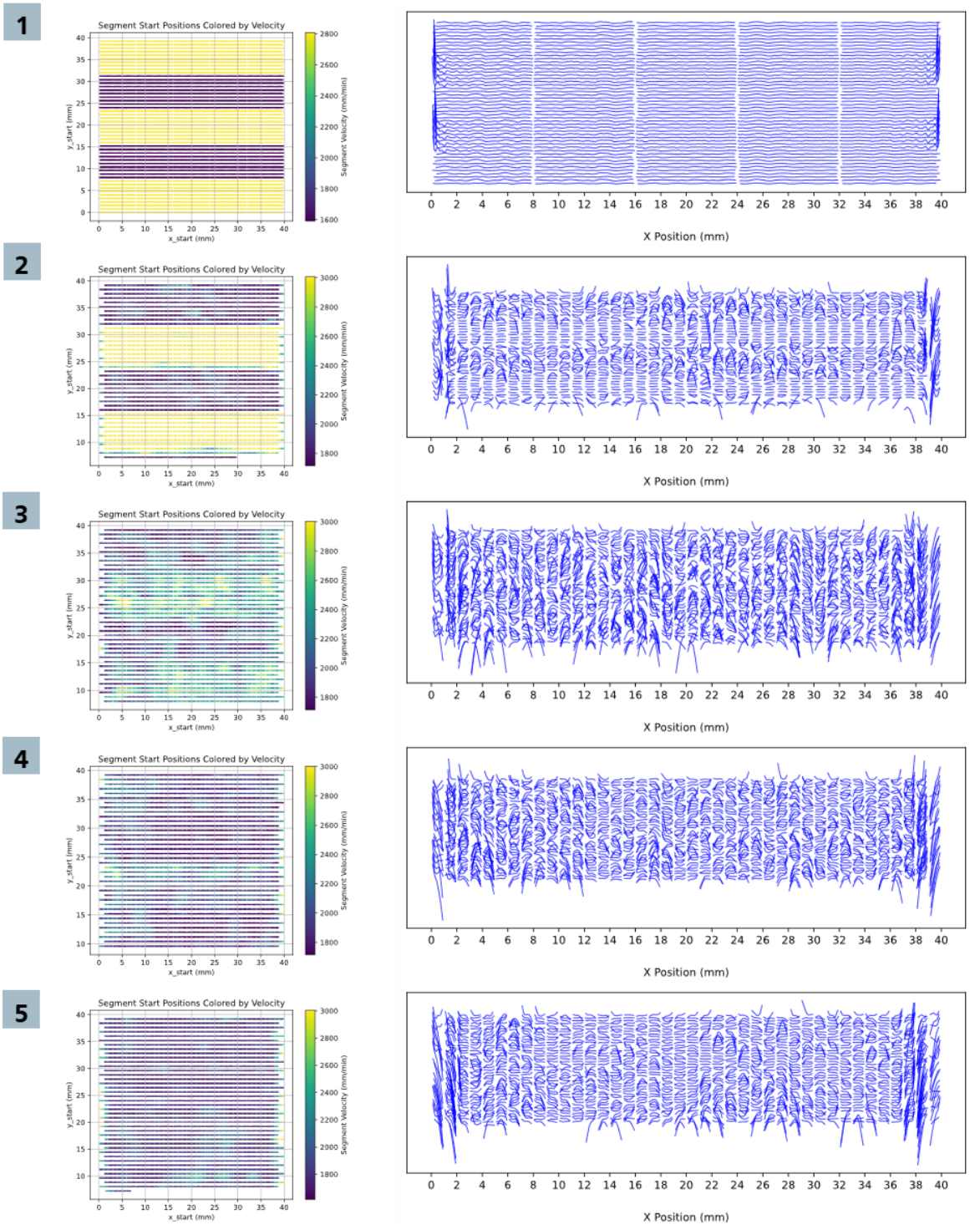

Abbildung 27: Geschwindigkeits-Heatmap für einen Würfel mit fünf Lagen. Links: Lagenindex, Mitte: Gemessene IST-Geschwindigkeit, Rechts: Abweichung IST / SOLL-Geschwindigkeit für jedes gemessene Segment. In der ersten Lage wird absichtlich eine Höhendifferenz aufgebaut, indem zwei Geschwindigkeitsprofile gefahren werden. In den folgenden Lagen regelt das System die Höhendifferenz aus. In Lagen 3 bis 5 findet das System immer weniger Unterschied zwischen den Lagen und regelt die Höhe somit effektiv raus.

Wie bereits in dem vorangegangenen Kapitel 2.2 bis Kapitel 2.5 beschrieben, kann das Simulationsmodell 3D-Geometriedaten einlesen. Da die Scandaten des LLS direkt in das Koordinatensystem der Bahnplanung transformiert werden können, kann auf eine Registrierung der Oberflächen mittels Iterative-Closest-Point-Algorithmus verzichtet werden. Auf Basis dessen kann ein Höhenabgleich durchgeführt werden. Die Höhenabweichung kann in das Softwaremodul zur Bahnanpassung eingeladen und eine parametrisierte Anpassung der Bahnplanung vorgenommen werden. Die Bahnplanung kann als Update des momentanen Prozesses auf die Anlage gespielt und der Prozess fortgeführt werden. Geometrisch relevante Bauteilbereiche können mit einem Analysetool visualisiert und die Prozessschwankungen ausgewertet werden.

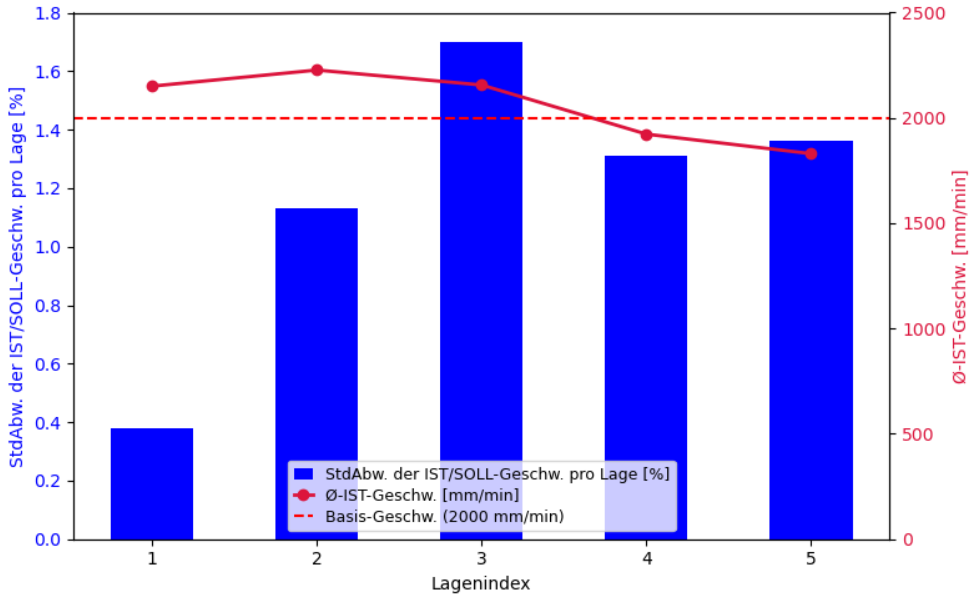

Abbildung 28: Geschwindigkeitsprofile für einen Würfel mit fünf Lagen. Links: Standardabweichung der IST/SOLL-Geschwindigkeit pro Lage. Rechts: Mittelwert der Ist-Geschwindigkeit pro Lage.

2.6 Arbeitspaket 6: Evaluierung der Wirksamkeit

Die Wirksamkeit des simulationsgestützte Gesamtkonzept zur Prozessausregelung beim Laserauftragschweißen (LMD) wird anhand der Schweißergebnisse unter Realbedingungen validieren. Hierfür wurde in einer ersten Lage ein horizontal gestreiftes Fehlerbild mit Überhöhungen aufgebaut und dieses anschließend in Lage 2 mittels der Demonstratorlösung kompensiert. Der Kontrollversuche erfolgt ohne die Verwendung der entwickelten SimuControl-Software, sondern mit einer konstanten Vorschubgeschwindigkeit für die gesamte Lage.

In Abbildung 29 sind die durch den LLS aufgenommenen Punktwolken der Lagen 1 und 2 in Form eines Differenzbildes dargestellt, das die Abweichung zur SOLL-Höhe visualisiert. Hierbei ist erkennbar, dass durch die Anwendung des simulationsgestützten Gesamtkonzepts der Anteil der Regionen mit Überhöhungen (blau) bereits inner-halb einer weiteren Lage nahezu kompensiert werden kann. Ohne Anpassung der Vorschubgeschwindigkeiten ist hingegen keine Reduktion der Höhenabweichung feststellbar.

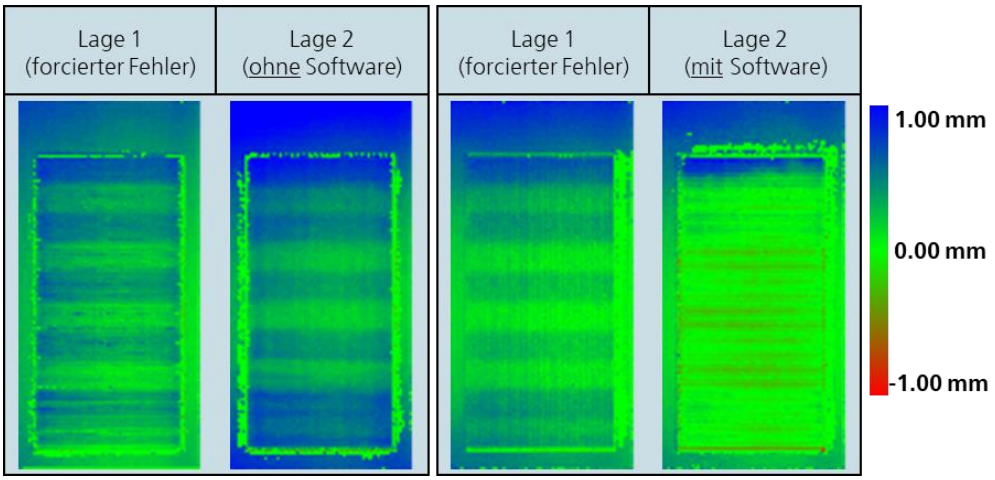

Abbildung 2: Differenzbilder Punktewolke mit und ohne Verwendung der SimuControl-Software

Des Weiteren sind auch Überhöhungen im Randbereich der Substratplatten erkennbar. Diese sind auf thermischen Verzug infolge der lokalen Einbringung von Wärme durch den Laser zurückzuführen und beeinflusst die LLS-Messung sowie den Höhenabgleich maßgeblich. Hierbei ist die Höhenausregelung nicht möglich, da die Höhenabweichung infolge von Prozessabweichungen nicht vom allgemeinen Verzug der Platte zu trennen ist. Für die Kompensation des Verzugs sind komplexe thermische Simulationen notwendig, welche im Rahmen des Projekts SimuControl nicht durchgeführt werden konnten, da diese für ganze Bauteile nicht Stand der Technik sind.

Zur Minimierung des Verzugs wurde im Anschluss auf größeren Substratplatten weniger Material aufgetragen. Außerdem wurden die Substratplatten vorgewärmt, um die thermischen Gradienten zu Beginn des Prozesses zu reduzieren. Bei den in Abbildung 30 gezeigten Differenzbildern handelt es sich um Ausschnitte einer größeren Substratplatte. Zur Verbesserung der Auflösung der Darstellung wurde der Wertebereich des Skalars halbiert. Auch in diesem Versuch wurde erneut in Lage 1 bewusst ein Höhenprofil aufgebaut. Dieses wird nahezu vollständig durch Lage 2 kompensiert. Durch die Kompensation in Lage 4 wird jedoch eine Höhenabweichung erzeugt, welche jedoch in der nachfolgenden Lage 5 wieder verringert wer-den kann. Die sichtbaren Höhendefizite am Rand des Würfels (rot) treten am An-fang und Ende der einzelnen Schweißbahnen auf und können auf die Bahnplanung ohne Konturfahrt zurückgeführt werden.

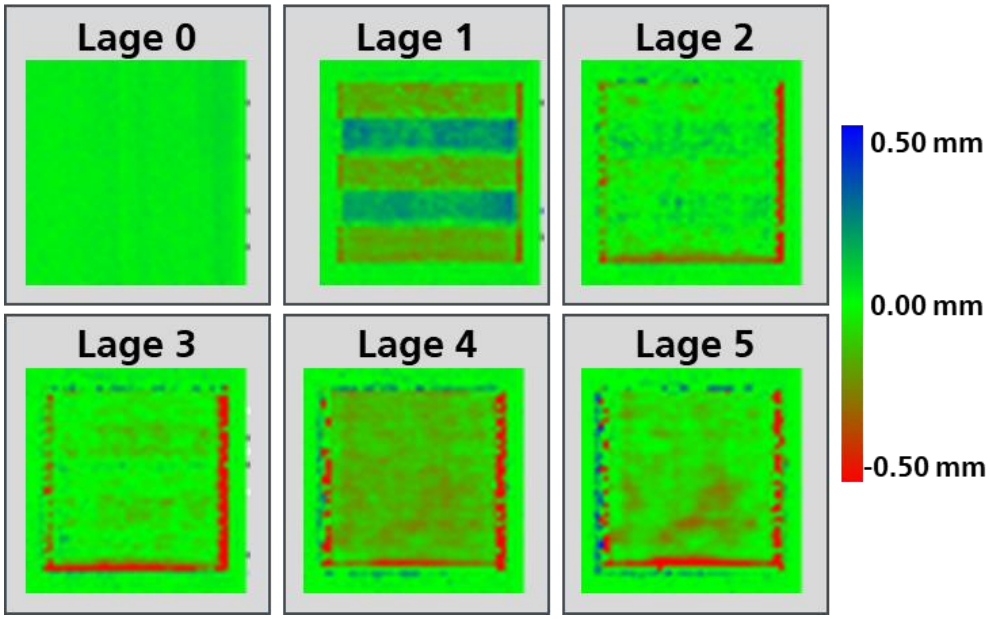

Abbildung 30: Entwicklung der Differenzbilder eines Würfels von Lage 0 bis Lage 5

Die entwickelte Software sowie die dazugehörigen Schnittstellen ermöglichen eine automatisierte Prozessausregelung auf Basis der erfassten Messdaten.

Als Hardware wird lediglich ein Laserlinienscanner benötigt, der als Tool direkt mit der Anlage verknüpft ist. Hierfür stehen bereits verschiedene geeignete industrielle Lösungen zur Verfügung. Da die Kompensationskurve materialspezifisch ist, muss sie für jedes Materialsystem neu bestimmt werden. Ein Leitfaden zur Ermittlung dieser Kurve wurde in Kapitel 2.2 skizziert. Der technische und wirtschaftliche Nutzen sowie die Integrationsfähigkeit des entwickelten Konzepts in bestehende Produktionssysteme, insbesondere bei KMU, konnten somit erfolgreich nachgewiesen werden.

2.7 Arbeitspaket 7: Projektergebnisse

Planmäßig erfolgt die Dokumentation der im Projekt erarbeiteten Ergebnisse und der Transfer der Ergebnisse in die Wirtschaft. Die hierbei durchgeführten Transfermaßnahmen lassen sich Kapitel 7 entnehmen.

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
ILT	Wissenschaftlicher Angestellter HPA-A	24,00 PM

Die im Rahmen des Projektes beschäftigten studentischen Hilfskräfte waren projektbegleitend mit 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

Insgesamt entsprechen die geleisteten Arbeiten dem begutachteten und bewilligten Antrag und waren daher für die Durchführung des Forschungsvorhabens notwendig und angemessen. Die ausgeführten Arbeiten wurden mit den Mitgliedern des PA besprochen und für das Erreichen des Projektziels gemeinsam für notwendig und angemessen befunden. Im Rahmen des Vorhabens wurden zwei der projektbeteiligten Unternehmen Software-Komponenten bereitgestellt, die zur Umsetzung der zu entwickelnden echtzeitfähigen Schnittstellen benötigt wurden. Aufgrund von marktbedingten Verzögerungen bei der Bereitstellung und Installation sowie die wurde die Projektlaufzeit kostenneutral um sechs Monate verlängert, um die abschließenden Evaluierungen und en Transfer in die Industrie in vollem Umfang leisten zu können.

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

Das Konzept zur simulationsgestützten, intermittierenden Prozessausregelung zur Verbesserung der Formgebung von DED-Prozessen konnte zum Ende des Projekts erfolgreich verifiziert und dokumentiert werden. Endanwender erhalten so die Möglichkeit, praktisch von den Ursache-Wirkbeziehungen zu profitieren und ihre Prozesse auf bestehenden Anlagen zu verbessern. Weiterhin wird das ILT die Erkenntnisse in der Gestaltung neuer AM-Normen im Rahmen der Kollaboration und Mitgliedschaft mit der ASTM (Committee F42 on Additive Manufacturing Technologies) einbringen.

CAM- und Sensorik-Anbieter erhalten eine umfassende Übersicht über die zugrundeliegende Thematik sowie Informationen über die zur Umsetzung notwendigen Modelle bzw. Schnittstellen. Eine unmittelbare Umsetzung ist damit wahrscheinlich und eigenständig möglich. Der im Rahmen des Projekts entwickelte Hard- und Softwaredemonstrator kann zudem die Wirksamkeit der erarbeiteten Methodik veranschaulichen. Darauf aufbauend ist es möglich, ihn zu einer kommerziellen Lösung weiterzuentwickeln und dem Markt zur Verfügung zu stellen. Fertigende Unternehmen werden in die Lage versetzt, individuelle Fertigungsaufträge schneller und zuverlässiger zu planen. Das Risiko von Qualitätsproblemen bei flexiblen Um- und Neuplanungen sinkt erheblich.

Bezogen auf die CAM-Planung bei Endanwendern werden die Ergebnisse zeitverzögert nach Projektende, flächendeckend verfügbar sein. Es ist davon auszugehen, dass durch die intensive Zusammenarbeit mit mehreren kleinen und mittleren Fertigungsbetrieben eine bedarfsorientierte Bahnplanung vorliegen wird. Darüber hinaus haben sich teilnehmende Unternehmen bereiterklärt, über die Projektlaufzeit hinaus die Ergebnisse miteinander zu diskutieren und sich bei der Fortentwicklung bis hin zur Marktreife unterstützend einzubringen.

In Summe kommen die erarbeiteten Lösungen kommen dabei unmittelbar den KMU zugute, insbesondere da strategisch kurzfristige sowie langfristige Lösungsansätze den Prozess kontinuierlich verbessern und somit einerseits die technologische Lücke zwischen Forschung und Wirtschaft schließen wie andererseits die Maßhaltigkeit des Prozesses steigern, sodass eine Nutzung seitens KMU ermöglicht wird. Vorteile des Ansatzes sind:

- Genauere Maßhaltigkeit und Formgebung durch verbesserte Prozessstabilität mittels simulationsgestützter, intermittierender Prozessführung
- Verbesserung der Anlagennutzung und Zeitersparnis durch weniger Trial-and-Error Prozessoptimierung

- Lagenweiser Vergleich zwischen geplantem und absolviertem Prozess stellt Prozessverständnis in einem feineren Detailgrad dar und trägt zur langfristigen Ver-besserung des Prozesses bei.
- Die Datenrückführung aus dem Simulationsmodell stellt Technologiewissen bereits in der CAM-Planung zur besseren Auslegung des Prozesses bereit.
- Aufbau einer technologischen Datenbank zur Erhöhung des Prozessverständnisses durch Auswertung von Prozessparameter-abhängigen Simulationsmodellen.

6 Wissenstransfer in die Wirtschaft

Die FVP pflegt durch ihre Mitglieder einen intensiven Austausch mit der produzieren-den Industrie. Auch am Fraunhofer ILT ist der Kontakt zu Anwendern aus der Industrie aufgrund zahlreicher Verbund- und bilateral vereinbarter Projekte traditionell sehr eng. So wurden und werden die Ergebnisse des beantragten Forschungsvorhabens der Industrie und Öffentlichkeit geeignet zur Verfügung gestellt werden. Geleistete Maßnahmen sind dabei die Folgenden:

- Die Forschungsergebnisse wurden in Form eines Projektberichtes präsentiert, der allen Beteiligten und Interessenten kostenlos zugänglich gemacht wird
- Die Anforderungen und Ergebnisse wurden im Rahmen von Praxisworkshops in Zusammenarbeit mit den Industriepartnern der beteiligten Institute erhoben bzw. vorgestellt. Hinsichtlich des Ergebnistransfers wurden im letzten Quartal der Projektlaufzeit am ILT-Praxisversuche organisiert, indem Fachleute aus Forschung und Wirtschaft die hier erarbeiteten Ergebnisse anhand des Demonstrators erproben können.
- Durch Teilnahmen an nationalen und internationalen Fachtagungen und Fachkonferenzen (bspw. WGP- oder CIRP-Konferenz) sowie durch Fachbeiträge in entsprechenden Organen wurden die Projektergebnisse dem weltweiten Fachpublikum zugänglich gemacht
- Durch öffentliche Vorträge an der Hochschule wurden die im Projekt entwickelten Techniken und die erzielten Ergebnisse präsentiert
- Neben dem direkten Wissenstransfer der am Projekt beteiligten Wissenschaftler und Ingenieure, sind die Ergebnisse auch in die akademische Lehre und Ausbildung der Studenten eingeflossen

Eine genaue Auflistung der geleisteten Transfermaßnahmen lassen sich Kapitel 7 entnehmen.

Die beteiligten Institute bieten Industriepartnern Integrationshilfe als Dienstleistung beim Einsatz der entwickelten Bahnoptimierungen (v. a. bei der Einrichtung der Simulationsumgebung) sowie Seminare und Schulungen an. Die Ergebnisse dieses Projektes dienen weiterhin auch der Weiterentwicklung von Unterstützungsmethoden der Arbeitsvorbereitung und werden damit in nachfolgenden Forschungsprojekten und Produktentwicklungsprozessen verwertet.

7 Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

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.

Tabelle 5: Durchgeführte Transfermaßnahmen

Transfermaßnahme	Datum
Erstellung und Pflege einer Projekt-Website	01.01.2023 bis 31.05.2025
Treffen des projektbegleitenden Ausschusses	18.01.2023
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	16.06.2023
Treffen des projektbegleitenden Ausschusses	13.09.2023
Vorstellung der Projektergebnisse auf der Weltleitmesse für Produktionstechnologie EMO 2023 in Hannover	18.09.2023 bis 23.09.2023
Treffen des projektbegleitenden Ausschusses	15.12.2023
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	17.04.2024
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	14.08.2024
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

Projektvorstellung beim Kuratorium des Fraunhofer ILT 2024	25.11.2024
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	18.06.2025
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. Aufbauend auf den im Projekt erzielten Ergebnissen werden aktiv Folgeprojekte angestrebt, um (i) die Integration in reale KMU-Umgebungen zu vertiefen und (ii) die Bedienbarkeit weiter zu erhöhen.

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 SimuControl-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 ILT 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 ILT-Jahresbericht 2026	01/2026
Veröffentlichung des Schlussberichts auf den Websites von ILT 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