

**Schlussbericht des  
Instituts für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*)  
der Technischen Universität München  
zum Verbundprojekt**

Vollautomatisierte Additive Fertigung mit DED-Verfahren für die automobiler  
Serienproduktion

**Akronym:** AdDEDValue

**AdDEDValue**

**Teilprojekt:** Intelligente Datenauswertung und Simulation

**Laufzeit:** 01.10.2021–31.12.2024

**Förderkennzeichen:** 13IK002L

**Zuwendungsempfänger:** Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*), Technische Universität München (TUM)

Prof. Dr.-Ing. Michael F. Zäh  
Boltzmannstraße 15  
85478 Garching  
Tel.: 089 289 15501  
E-Mail: michael.zaeh@iwb.tum.de

**Verbundbeteiligte:**

Fritz Automation GmbH  
Volkswagen AG  
AGCO GmbH  
KÖNIG METALL GmbH & Co. KG  
Siemens AG  
iSYS Software GmbH  
Automation W+R GmbH  
Boll Automation GmbH  
roeren GmbH  
applicationtechnology GmbH & Co. KG  
Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften  
Precitec GmbH & Co. KG (assoziierter Partner)  
EMAG GmbH & Co. KG (assoziierter Partner)

## Inhaltsverzeichnis

1	Kurzdarstellung .....	1
1.1	Aufgabenstellung .....	1
1.2	Voraussetzungen .....	6
1.3	Planung und Ablauf des Projekts .....	8
1.4	Stand der Wissenschaft und Technik, an dem angeknüpft wurde .....	8
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen .....	14
2	Eingehende Darstellung .....	15
2.1	Verwendung der Zuwendung und Arbeitsergebnisse des Teilprojekts .....	15
2.2	Verwertung der Ergebnisse .....	43
	Literaturverzeichnis .....	49

# 1 Kurzdarstellung

## 1.1 Aufgabenstellung

### Gesamtziele des Verbundes

Die deutsche Fahrzeug- und Zulieferindustrie sieht sich aktuell mit tiefgreifenden strukturellen Veränderungen konfrontiert, welche in besonderem Maße die Produktion betreffen. Wesentliche Treiber hierfür sind unter anderem die zunehmende Digitalisierung über die gesamte Wertschöpfungskette hinweg sowie die Forderung nach einer nachhaltigen Reduktion des Gesamtressourcenverbrauchs. Durch den zunehmenden internationalen Wettbewerb, insbesondere im Bereich der neuen Antriebstechnologien, drohen der deutschen Automobilbranche Einbußen bedeutender Marktanteile, was langfristig den Verlust einer Vielzahl an Arbeitsplätzen an den deutschen Produktionsstandorten zur Folge hätte [1]. Weiterhin erfordert die steigende Variantenvielfalt neuartige Fertigungsverfahren und hochflexibilisierte Fertigungsketten, um qualitativ hochwertige Bauteile auch in Kleinserien wirtschaftlich und prozesssicher herstellen zu können.

Um diesen Herausforderungen zu begegnen und damit die Wettbewerbsfähigkeit des Produktionsstandorts Deutschland langfristig zu sichern, ist die Einführung innovativer Technologien, die eine kostengünstige und hochflexible Fertigung ermöglichen, ein entscheidender Faktor. Durch die allgegenwärtige Zunahme der Digitalisierung in der produzierenden Industrie eröffnen sich neue Möglichkeiten, um einen wichtigen technologischen Durchbruch mittels derartiger Technologien zu erzielen. Dies trifft in besonderem Maße auf die DED-Verfahren (DED: Directed Energy Deposition, dt.: Materialauftrag mit gerichteter Energieeinbringung) zu, welche einen Teilbereich der additiven Fertigungsverfahren darstellen und zu denen das Laserauftragschweißen (engl.: Laser Metal Deposition, LMD) sowie die draht- und lichtbogenbasierte Additive Fertigung (engl.: Wire Arc Additive Manufacturing, WAAM) zählen. Diese Fertigungsverfahren können sowohl zum Beschichten als auch zum additiven Aufbau komplexer Bauteile eingesetzt werden, wobei sie hohe Auftragsraten verglichen mit anderen additiven Fertigungsverfahren erlauben. Insbesondere in Verbindung mit geeigneter Sensorik stellen die DED-Verfahren in verschiedensten Bereichen der automobilen Lieferketten eine zukunftsweisende und wirtschaftliche Alternative zu den etablierten Fertigungsverfahren dar. Im Kontext der Digitalisierung ergeben sich hierbei durch die intelligente Nutzung von Prozess-, Anlagen- und Bauteildaten vielfältige Potenziale, wodurch die industrielle Relevanz der Verfahren signifikant gesteigert wird.

Das Hauptziel des Projektes **AdDEDValue** war es daher, die DED-Verfahren für unterschiedliche Seriengrößen, von der Losgröße 1 bis zur Großserie, in der Fahrzeugproduktion zu etablieren und in die bestehenden Fertigungsketten mit ihrem steigenden Digitalisierungsgrad einzubetten. Die Vielzahl und die Komplexität der Einflussfaktoren, Wechselwirkungsmechanismen und Prozessphänomene erfordert jedoch ein hohes Maß an Erfahrung und Expertise der Bedienerinnen und Bediener in der Prozessauslegung, -führung und -kontrolle. Eine erfolgreiche produktionstechnische Anwendung der DED-Verfahren hängt daher in entscheidendem Maße von deren Automatisierungsgrad sowie einer effizienten Ein-

gliederung in die Fertigungskette ab. In diesem Zusammenhang stellt die Möglichkeit der Erfassung und weiterführenden Nutzbarmachung von Daten für die Qualitätssicherung bereits während des Fertigungsprozesses einen Schlüsselfaktor dar. Weiterhin spielen für eine zusätzliche Erhöhung des Automatisierungsgrades der DED-Verfahren und damit ihrer Wirtschaftlichkeit hochinnovative digitale Werkzeuge, wie die simulationsgestützte Prozessplanung oder Methoden des Maschinellen Lernens, eine bedeutende Rolle. Die Anwendung dieser additiven Fertigungsverfahren eröffnet neue Möglichkeiten zur Stärkung der Durchsetzungsfähigkeit deutscher Unternehmen im internationalen Wettbewerb durch Kosteneinsparungen sowie eine Sicherstellung der Produktqualität. Darüber hinaus bietet der Einsatz der DED-Verfahren ein hohes Potenzial hinsichtlich einer flexibilisierten Produktion sowie der Reduktion des Gesamtressourcenverbrauchs in der Fahrzeugproduktion [2, 3].

Die im Rahmen des Projektes erzielten Arbeitsergebnisse trugen und tragen weiterhin maßgeblich zur Stärkung der deutschen Standorte der beteiligten Unternehmen bei. Indem die DED-Verfahren als innovative Fertigungstechnologien in der Produktion erprobt, durch den gezielten Einsatz von Sensorik weiterentwickelt und in bestehende Fertigungsketten exemplarisch eingebunden wurden, ergeben sich für produzierende Unternehmen vielfältige Vorteile. Im Mittelpunkt des Projektes stand dabei der Umgang mit Daten über verschiedene Ebenen der Produktionshierarchie hinweg, wobei sowohl eine wirtschaftliche und prozesssichere Fertigung als auch die wertschöpfende Nutzung von Daten entlang der gesamten Lieferkette adressiert wurden. Die Forschungsergebnisse wurden während der Projektlaufzeit anhand von seriennahen und industriell einsetzbaren Funktionsmustern demonstriert. Darüber hinaus wurde der wirtschaftliche und technologische Mehrwert der DED-Verfahren als Ergebnis deutscher Forschungs- und Entwicklungsarbeit für die Klein-, Mittel- und Großserienproduktion anhand von Anwendungsbeispielen der Konsortialpartner KÖNIG METALL, AGCO und VW herausgestellt.

Deutsche Fertigungsunternehmen, welche aufgrund des Fachkräftemangels zunehmend unter Druck gesetzt werden, können das Potenzial intelligenter und adaptiver Produktionssysteme im Hinblick auf geringere Rüst- und Anfahraufwände sowie einen höheren Automatisierungsgrad für die Stabilisierung ihrer Lohnkosten nutzen. Die Übertragbarkeit des Ansatzes, insbesondere im Hinblick auf die umfassende Datennutzung innerhalb ganzer Wertschöpfungsnetzwerke, stellt hierbei einen bedeutenden Mehrwert für den Wirtschaftsstandort Deutschland dar.

Für einen zuverlässigen und nutzbringenden Einsatz der DED-Verfahren im Produktionsumfeld wurde ein ganzheitlicher und interdisziplinärer Ansatz gewählt. Dazu wurden von den Partnern Kompetenzen auf allen Ebenen der Produktionshierarchie sowie aus Bereichen der gesamten automobilen Fertigungskette eingebracht. Abbildung 1 zeigt die Kernelemente und Ebenen, die zur Integration der DED-Verfahren in die automobilen Fertigung erforderlich waren:

- Auf der Prozess- und Prozesskettenebene erlaubte und erlaubt die integrierte Sensorik eine Inline-Interpretation von in situ aufgenommenen Daten und damit die Vorhersage von Prozessgrößen und Produkteigenschaften. Diese Vorhersage ist zusätzlich durch die Kopplung mit aus Prozesssimulationen gewonnenen Daten unterstützt. Eine Inline-Prozessregelung ermöglicht einen robusten Einsatz der hochdynamischen und komplexen Fertigungsprozesse.

- Auf Maschinen- und Anlagenebene wurde eine geeignete Systemarchitektur realisiert und die Prozessüberwachungssysteme wurden in bestehende Anlagen integriert. Ein Fokus lag auf der Verbesserung der Maschinen- und Verfahrenszuverlässigkeit. Durch die Analyse von Prozess- und Anlagendaten wurden dem maschinenbedienenden Personal Erkenntnisse und Handlungsempfehlungen für eine vereinfachte und transparentere Verfahrensführung zur Verfügung gestellt.
- Auf Fertigungs- und Produktionsnetzwerkebene erfolgte eine exemplarische Integration in bestehende Produktionslinien sowie -abläufe und damit die anwendungs- und ggf. unternehmensübergreifende Erschließung der Potenziale der DED-Verfahren. Ein entscheidender Faktor war dabei die Nutzbarmachung der gewonnenen Bauteildaten entlang der gesamten Lieferkette.

Durch den gesamtheitlichen und interdisziplinären Ansatz konnten die Potenziale der DED-Verfahren in der automobilen Serienproduktion aufgezeigt, in verschiedenen Anwendungsszenarien implementiert und erprobt, und dadurch lieferkettenübergreifend beschleunigt erschlossen werden.

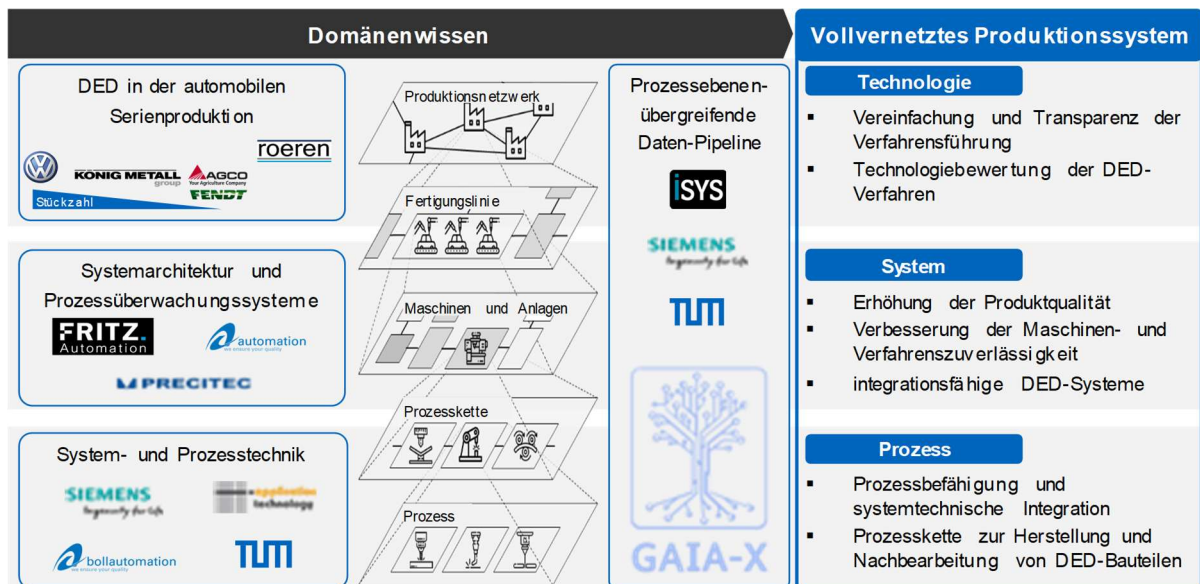


Abbildung 1: Adressierte Produktionsebenen sowie inhaltliche Zuordnung der Projektpartner zu den Projektschwerpunkten

Der Ansatz wurde zur Projektlaufzeit an den folgenden drei herausfordernden industriellen Anwendungsfällen umfassend validiert und öffentlichkeitswirksam demonstriert:

- hochflexible Fertigung in Kleinserien aus der Landmaschinenfertigung mit hoher Variantenvielfalt (AGCO)
- Mittelserien-Anwendungen aus der Zulieferindustrie im Bereich der Rohr- und Blechverarbeitung (KÖNIG METALL)
- Aufbringen von Verschleißschuttschichten auf Bremsscheiben in der Großserienproduktion (VW)

Innerhalb der im Konsortium durchgeführten Forschungsarbeiten wurden konkrete wissenschaftliche und technische Arbeitsziele umgesetzt.

## Teilprojektspezifische Ziele der TUM

Im Rahmen des Teilprojektes „Intelligente Datenauswertung und Simulation“ (TUM, *iwb*) wurden aktuelle Forschungsfragen sowohl zur Additiven Fertigung mittels DED-Verfahren als auch zur spanenden Nachbearbeitung der generierten Bauteile detailliert beleuchtet. Dadurch konnten wesentliche Beiträge zur Erreichung des übergeordneten Ziels der Etablierung der Additiven Fertigung in der automobilen Serienproduktion geleistet werden. Auf Prozessebene wurden das drahtbasierte LMD, das WAAM sowie die spanende Nachbearbeitung beforscht. Neben den Prozessuntersuchungen lag der Fokus der TUM klar auf der simulationsgestützten Prozessplanung, der Datenauswertung sowie der Prozessautomatisierung.

Die Arbeitsergebnisse des Teilprojektes wurden unter industrienahen Umgebungsbedingungen evaluiert. Neben dem generierten Prozesswissen sind insbesondere die Methoden zur Erfassung von Prozessdaten mittels Sensorik zur zuverlässigen Interpretation dieser Daten sowie zu deren Nutzung für die Inline-Qualitätssicherung und die Prozessregelung verstärkt hervorzuheben. Diese Methoden weisen eine hohe Übertragbarkeit auf weitere (additive) Fertigungsverfahren auf und besitzen damit ein hohes Potenzial für vielfältige Anwendungsfälle über die Fahrzeugindustrie hinaus. Weiterhin wird das *iwb* als produktionstechnisches Forschungsinstitut die gewonnenen Forschungsergebnisse in Zukunft nicht nur für ein breites Spektrum an Industriepartnern nutzbar machen, sondern auch die Technologien im Rahmen zukünftiger Forschungsprojekte weiterentwickeln.

Um eine hohe Breitenwirkung erzielen zu können, wurden grundlegende und verallgemeinerbare Erkenntnisse in wissenschaftlichen Publikationen und auf nationalen und internationalen Konferenzen (siehe Abschnitt 2.2) veröffentlicht. Zudem wurden im Rahmen des Teilprojektes drei Promotionen der wissenschaftlichen Mitarbeitenden auf den Teilgebieten der Prozessregelung (Verteidigung am 01.07.2025) und der Prozesssimulation (Verteidigung voraussichtlich 2025/26) von DED-Verfahren sowie der spanenden Nachbearbeitung (Verteidigung voraussichtlich 2027/28) und die damit einhergehende ausführliche Veröffentlichung der Forschungsergebnisse in Form von drei Dissertationen geplant. Die drei Mitarbeitenden des *iwb* sind/waren Teil von insgesamt drei Abteilungen (Lasertechnik, Additive Fertigung und Werkzeugmaschinen) und arbeiteten im Projektverlauf eng miteinander zusammen.

Die TUM verfolgte im genannten Teilprojekt Zielstellungen aus drei Bereichen, die im Folgenden aufgeführt sind.

### Laserauftragschweißen:

Das Laserauftragschweißen mit koaxialer Drahtzufuhr innerhalb eines ringförmigen Strahlprofils (in diesem Bericht mit LMD bezeichnet) stellt eine hochinnovative Prozessvariante dar, da hierdurch im Gegensatz zur lateralen Drahtzufuhr ein richtungsunabhängiger Materialauftrag ermöglicht wird. Das wird durch jüngste Entwicklungen von Bearbeitungsoptiken, welche ein derartiges Strahlprofil formen, ermöglicht. Diese Prozessvariante konnte von der TUM umfassend beforscht und weiterentwickelt werden. Trotz der Vorteile der koaxialen Strahlführung sind neue Fertigungsaufgaben mit einem hohen Aufwand für das Finden geeigneter Prozessparameter verbunden. Ohne angepasste Parameter kann es beispielsweise durch eine Überhitzung des Bauteils oder eine Abweichung zwischen der Schichthöhe und der Höhenzu-

stellung zu Defekten im Bauteil kommen. Somit war das Einstellen definierter Bauteileigenschaften beim LMD zum Zeitpunkt der Antragstellung nicht ohne hohen Versuchsaufwand möglich und erforderte ein umfangreiches Fachwissen des bedienenden Personals. Um den Aufwand für langwierige Parameterstudien zu reduzieren und damit das LMD weiter in der Industrie zu etablieren, war eine Erhöhung des Automatisierungsgrades von entscheidender Bedeutung. Dies konnte durch eine umfängliche Datenerfassung mittels geeigneter Sensorik in Verbindung mit einer intelligenten Datenverarbeitung sowie einer darauf basierenden Prozessregelung erreicht werden. Im Forschungsprojekt konnten hierzu zukunftsweisende Forschungsergebnisse im Bereich der Prozessüberwachung und -regelung beim LMD erzielt werden:

- erweitertes Prozessverständnis im Hinblick auf die Zusammenhänge zwischen den relevanten Prozesseinflussgrößen und den Bauteileigenschaften
- entwickeltes Konzept für das Inline-Monitoring der relevanten Prozessantworten mittels innovativer Sensorsysteme
- Messstrategien basierend auf der für das drahtbasierte Laserauftragschweißen erstmals eingesetzten optischen Kohärenztomographie (OCT)
- Algorithmen zur intelligenten Prozessdatenaufbereitung und -interpretation
- aufgebaute Mehrgrößen-Prozessregelung für eine prozesssichere Fertigung von Bauteilen in der Automobilproduktion

### **Prozesssimulation und Bahnführung:**

Charakteristisch für DED-Verfahren ist der sukzessive hoch-fokussierte Energieeintrag während des Fertigungsprozesses. Dabei spielen einerseits die Prozessparameter, wie die Leistung und die Vorschubgeschwindigkeit, und andererseits die Bahnführung, also der Verlauf des DED-Werkzeugs, eine entscheidende Rolle in der Ausbildung der mechanischen und physikalischen Eigenschaften des Bauteils. Eine ungünstige Wahl der Prozessparameter oder der Bahnführung kann in lokalen Überhitzungen und unerwünschten Verformungen resultieren. Die Auswahl der Prozessparameter wurde zu Beginn des Forschungsprojektes erfahrungsbasiert durchgeführt. Nach dem Fertigungsprozess wurde das Bauteil vermessen und auf die Erfüllung der Toleranzanforderungen überprüft. Bei Bedarf wurden die Fertigungsparameter anhand der Messergebnisse erneut erfahrungsbasiert angepasst. Diese Vorgehensweise geht mit langen Iterationsdauern und hohen Kosten einher, da in jeder Iteration ein neues Bauteil gefertigt werden muss.

Um kritische Bereiche bereits vor dem Fertigungsprozess zu identifizieren, wurde der DED-Prozess durch eine Simulation abgebildet. Temperaturen und Verzüge des Bauteils wurden numerisch berechnet, sodass die Anpassung der Prozessparameter sowie der Bahnführung digital durchgeführt werden konnte. Anstatt auf subjektive Erfahrungen zurückzugreifen, konnten die Parameter in einer Optimierungsumgebung ausgewählt werden. Die Iterationen fanden digital statt, sodass keine Ausschussteile produziert werden. Eine aussagekräftige Prozesssimulation des DED-Prozesses stellte einen wichtigen Schritt für die industrielle Etablierung von DED-Verfahren dar. Im Forschungsprojekt konnten in den Bereichen der Prozesssimulation und der Bahnführung folgende Ziele erreicht werden:

- detaillierte Abbildung der DED-Prozesse in einer thermomechanischen Finite-Elemente-Simulation
- experimentelle Validierung der Modelle
- Entwicklung geeigneter Schnittstellen zwischen der Prozesskette und der Prozesssimulation
- simulationsgestützte Optimierung der Prozessparameter und der Bahnführung
- „First-Time-Right“-Fertigung von komplexen Komponenten

### **Nachbearbeitung:**

Aufgrund der vielfältigen Möglichkeiten, auch stark belastete Strukturkomponenten durch additive DED-Verfahren herzustellen, kommt der spanenden Nachbearbeitung eine hohe Bedeutung zur Einhaltung von Lage-, Form-, Maß- und Oberflächentoleranzen zu. Der Einsatz von roboterbasierten Nachbearbeitungsprozessen verspricht dabei im Vergleich zu herkömmlichen Bearbeitungszentren enorme wirtschaftliche Potenziale. Zusammen mit Boll entwickelte die TUM eine übertragbare Methode zur Vorhersage des Abdrängungsverhaltens von Fräsrobotern. Außerdem wurde durch die TUM eine Methode erarbeitet, um die zu erwartenden dynamischen Instabilitäten aufgrund der welligen Oberflächen von DED-Komponenten zu verhindern. Im Rahmen des Forschungsprojekts wurden dazu innovative Forschungsergebnisse im Bereich der intelligenten Prozessplanung und roboterbasierten Nachbearbeitung erzielt:

- übertragbare sowie aufwandsreduzierte Methoden zur Bestimmung der Abdrängung von Fräsrobotern (Lasertracker und Motion-Tracking-System, Kraftmessplattform und Kofferwaage sowie reduzierte Datenmengen), quantifizierte Unsicherheit der Steifigkeitswerte und Methode zur Datenvorverarbeitung
- abgeleitete Handlungsempfehlungen zur Vermeidung selbsterregter Schwingungen bei der spanenden Nachbearbeitung mit Fräsrobotern und Empfehlungen zur Prozessparameterwahl in Hinblick auf die Zerspanbarkeit des additiv gefertigten Rohteils
- Anforderungen an Einspannkonzeppte für additiv gefertigte Rohteile, unterschiedliche Einspannkonzeppte für verschiedene Rohteil-Geometrien und Rohteil-Schwingungsverhalten für unterschiedliche Einspannkonzeppte
- Demonstratorbauteil zur Untersuchung möglicher plattformübergreifender Einmessstrategien und zur Identifikation von Schwächen optischer und taktiler Messsysteme
- entwickelte Einmessstrategie mit Qualitätssicherungsschritt zur Reduzierung der Wahrscheinlichkeit von Bearbeitungsfehlern
- Handlungsempfehlungen für eine hohe Qualität entlang der Prozesskette und Methode zur Sicherung einer hohen Einmessqualität

## **1.2 Voraussetzungen**

Das *iwb* der TUM beschäftigt sich seit ca. 25 Jahren mit additiven Fertigungsverfahren. Bei den pulverbettbasierten Verfahren besteht umfangreiche Erfahrung im Bereich der Simulation

und Kompensation von Bauteilverzügen sowie bei der thermografiebasierten Prozessüberwachung. Zusätzlich wurden in abgeschlossenen und laufenden DFG-Projekten Strategien zur metamodellbasierten Verzugsminimierung beim Laserstrahlschweißen entwickelt. Hilfreich für das Projekt waren außerdem die Kompetenzen aus BMBF-Projekten im Bereich der Robotik, insbesondere auf dem Gebiet des roboterbasierten Schweißens und der Entwicklung von Algorithmen zur Offline-Bahnplanung. Eine Prozessuntersuchung und -überwachung beim WAAM, eine spanende Bauteilbearbeitung sowie der Aufbau einer überbetrieblichen vernetzten Prozesskette wurde im Rahmen mehrerer vom BMWK geförderter Projekte untersucht (z. B. Regulus; Förderkennzeichen 20W1709D, QuSAM; Förderkennzeichen 20Q2121E, eRep; Förderkennzeichen: 02J21E112).

Zur Erweiterung des Prozessverständnisses beim WAAM wurden im DFG-geförderten Projekt SFB TRR 277 (Projektnummer: 414265976) numerische Prozessmodelle erstellt. Diese bildeten die Temperaturverteilungen in WAAM-gefertigten Bauteilen ab und berücksichtigen die Einflüsse von gezielt gekühlten Bereichen. Somit konnte eine geeignete Kühlstrategie theoretisch abgeleitet sowie anschließend in den Versuchsaufbau integriert und validiert werden. Darüber hinaus wurde in einem Forschungsprojekt, gefördert vom StMWi (WAAMSim; Förderkennzeichen: NW-1901-0004), die Entwicklung einer Simulationsumgebung zur Verzugsminimierung von WAAM-Bauteilen aus Ti6Al4V und Al4,5Mg0,7Mn erforscht.

Die bestehenden Vorarbeiten im Bereich der Fräsbearbeitung additiv gefertigter Werkstoffe und der Kompensation der Werkstücknachgiebigkeit bei der Bearbeitung dünner langauskragender Stege, welche im Rahmen des DFG-Schwerpunktprogramms 1480 entstanden sind, stellten eine wichtige Basis für das Arbeitspaket (AP) 7 des Forschungsprojekts dar. In der spanenden Nachbearbeitung additiv gefertigter Bauteile [4–6] und in der spanenden Bearbeitung durch Fräsroboter [7–11] konnte das *iwb* bereits umfangreiche Arbeiten durch vorangegangene Dissertationen aufweisen. Die Ergebnisse wurden in zahlreichen wissenschaftlichen Publikationen veröffentlicht oder auf Fachkonferenzen vorgestellt.

Auch im Bereich der KI-basierten (KI: Künstliche Intelligenz) Qualitätssicherung lagen bereits Erfahrungen vor. Im IGF-Projekt AProKI (Nr. 21161 N) wurden Algorithmen zur datenbasierten Vorhersage der Nahtqualität von rührreibgeschweißten Verbindungen entwickelt.

Im Hinblick auf die Bereiche Lasermaterialbearbeitung, Sensorik und Datenverarbeitung wurden im BMBF-geförderten Forschungsprojekt RoKtoLas (Förderkennzeichen: 13N14555) umfangreiche Vorarbeiten geleistet. Dabei wurde eine ganzheitliche und echtzeitfähige Prozessbeobachtung und -regelung für das Remote-Laserstrahlschweißen als Basis hochflexibler Produktionsanlagen entwickelt. Die grundlegende Anwendung von Machine-Learning-Methoden zur Qualitätsbeurteilung von Bauteilen und zur Echtzeit-Einschweißtiefenregelung zeigte hier das Potenzial KI-basierter Laserschweißsysteme zur hochflexiblen Herstellung hochwertiger Bauteile in kleinen Losgrößen auf.

Im ebenfalls BMBF-geförderten Forschungsprojekt KORESIL (Förderkennzeichen: 02P20Z002) konnten Erkenntnisse zum Aufbau von Leichtbaustrukturen mithilfe des drahtbasierten Laserauftragschweißens mit koaxialer Strahlführung gewonnen werden. Hierbei wurde eine erste Wissensbasis im Hinblick auf geeignete Prozessführungsstrategien geschaffen, ohne jedoch die Prozessskalierung detailliert zu betrachten. An die gewonnenen Erkenntnisse konnte mit den in **AdDEDValue** durchgeführten Prozessuntersuchungen angeknüpft werden.

Das Verbundprojekt **AdDEDValue** konnte somit auf den Erkenntnissen und Erfahrungen aus zahlreichen themenübergreifenden Forschungsprojekten aufbauen und in vielen Fällen direkt an diese anknüpfen. Die in Abschnitt 1.1 erläuterten Zielsetzungen des Projekts gehen dabei deutlich über die Erkenntnisse der oben genannten Projekte hinaus.

### 1.3 Planung und Ablauf des Projekts

Die Projektlaufzeit war ursprünglich vom 1. Oktober 2021 bis zum 30. September 2024 angesetzt. Im Juli 2024 wurde eine kostenneutrale Verlängerung bis zum 31. Dezember 2024 beantragt und diese anschließend genehmigt.

Das Teilprojekt des *iwb* bestand aus 18 AP. Zu Beginn des Projektes wurde in den AP 2.1 und 2.3 notwendiges Prozessverständnis zum drahtbasierten LMD sowie zum WAAM generiert. In den AP 3.1 und 3.2 wurde die Prozessdatenerfassung mittels existierender sowie neu entwickelter Sensorsysteme beforscht. Die AP 4.2, 4.3 und 4.4 beinhalteten die Auswertung und Interpretation der DED-Prozessdaten. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse flossen sowohl in die simulationsgestützte Prozessplanung in AP 5 sowie in den Aufbau einer Mehrgrößen-Prozessregelung in AP 6 ein. Zusätzlich wurden die spanende Nachbearbeitung von mittels DED-Verfahren gefertigten Bauteilen sowie die nachgelagerte Qualitätssicherung in den AP 7.1 und 7.2 untersucht. Projektbegleitend wurde in AP 1 das Projekt- und Anforderungsmanagement verankert. Die restlichen AP 8.1, 8.3 und 8.4 dienten der Entwicklung und Erprobung von Funktionsdemonstratoren für das drahtbasierte LMD, das WAAM sowie die spanende Nachbearbeitung.

### 1.4 Stand der Wissenschaft und Technik, an dem angeknüpft wurde

#### 1.4.1 DED-Verfahren in der industriellen Fertigung

Die Additive Fertigung mit Metallen ist sowohl in der Industrie als auch in der Wissenschaft Gegenstand intensiver Forschung und Entwicklung. Abhängig von den geforderten Bauteileigenschaften steht den produzierenden Unternehmen eine breite Palette von additiven Fertigungsverfahren zur Verfügung. Die DED-Verfahren bilden hiervon einen Teilbereich. Ihnen gemein ist die lokale Aufbringung von Zusatzwerkstoff auf ein Substrat, wobei der Zusatzwerkstoff über eine Energiequelle aufgeschmolzen wird [12]. Durch eine schichtweise Wiederholung des Auftrags können dreidimensionale Bauteile aus Metall gefertigt werden. Verglichen mit dem selektiven Laser-Strahlschmelzen zeichnen sich die DED-Verfahren durch deutlich höhere Auftragsraten sowie die Möglichkeit zur Aufbringung von Werkstoff auf bestehende Bauteile aus [13]. Eine weitere bedeutende Anwendung der DED-Verfahren liegt neben der Additiven Fertigung in der Beschichtung von Bauteilen, beispielsweise um deren Verschleißbeständigkeit zu erhöhen. Hierbei werden im Unterschied zum generativen Aufbau von Strukturen flächendeckende Schichten des Zusatzmaterials auf hoch beanspruchte Bereiche eines bestehenden Bauteils aufgebracht [14].

Als wirtschaftlich relevanteste Verfahren sind das LMD, bei dem abhängig von der Verfahrensvariante sowohl Draht als auch Pulver als Zusatzmaterial verwendet werden kann, sowie das WAAM-Verfahren zu nennen. Die Prinzipien dieser Verfahren sind schematisch in Abbildung 2 dargestellt.

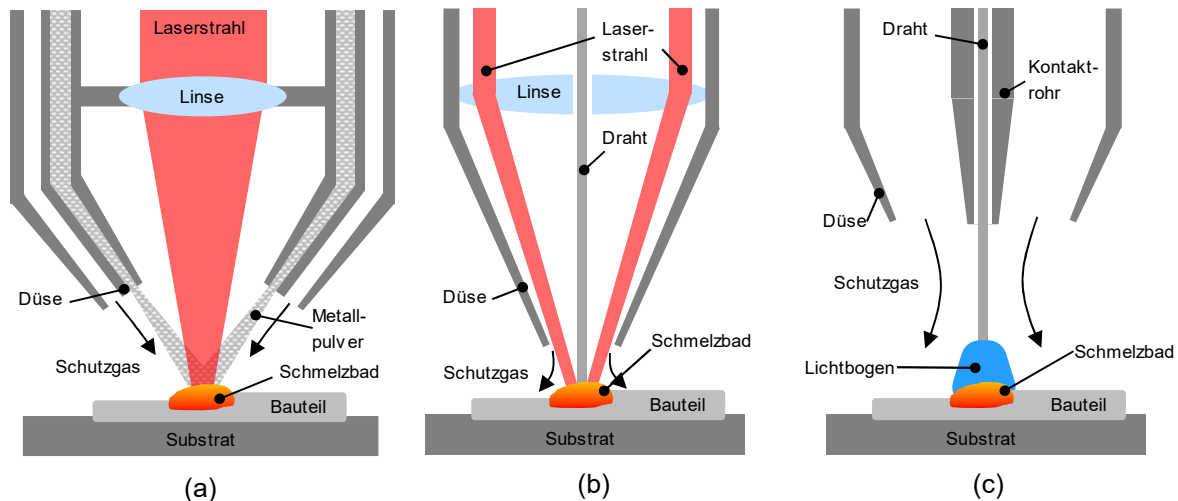


Abbildung 2: Prinzipien der betrachteten DED-Verfahren: (a) pulverbasiertes LMD, (b) drahtbasiertes LMD, (c) WAAM; in Anlehnung an [13]

In der Fahrzeugindustrie werden DED-Verfahren bereits vereinzelt eingesetzt, beispielsweise für den Werkzeugbau und die Werkzeugreparatur in der Karosseriefertigung. Nachfolgend werden wichtige Merkmale der Verfahren erläutert sowie ein Überblick über einige der jüngsten relevanten Forschungsaktivitäten gegeben.

Beim pulverbasierten LMD erfolgt die Materialzufuhr über einen Pulverstrom, der auf das durch Laserstrahlung erzeugte Schmelzbad gerichtet ist. Dieser Pulverstrom verläuft meist coaxial zum Laserstrahl durch eine ringförmige Düse, wodurch der Prozess unabhängig von der gewählten Bearbeitungsrichtung ist (Abbildung 2a). Als größte Nachteile des Verfahrens sind die Verschmutzung der Prozessumgebung durch Metallstaub sowie die dadurch entstehende Gesundheitsgefährdung für das bedienende Personal zu nennen. Eine bedeutende Entwicklung in diesem Bereich gelang dem Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT in Form des EHLA-Verfahrens (EHLA: Extremes Hochgeschwindigkeits-Laserauftragschweißen), wobei das zugeführte Pulver bereits oberhalb des Schmelzbades durch die Laserstrahlung aufgeschmolzen wird. Hierdurch lassen sich um ein Vielfaches höhere Prozessgeschwindigkeiten sowie ein sehr geringes Aufschmelzen des Grundwerkstoffes erreichen [15]. Aufgrund seiner daraus resultierenden hohen Wirtschaftlichkeit steht das EHLA-Verfahren daher an der Schwelle zum breiten industriellen Einsatz [16]. Eine bestehende Herausforderung des Verfahrens ist (aufgrund des hochdynamischen Pulverauftrags) die Integration von Inline-Qualitätssicherungssystemen, welche eine signifikante Verringerung des Aufwandes für nachgelagerte Prüfverfahren ermöglichen.

Im Gegensatz zum pulverbasierten LMD wird beim drahtbasierten LMD der Zusatzwerkstoff üblicherweise lateral zum Laserstrahl zugeführt, was in einer starken Richtungsabhängigkeit des Prozesses sowie einer eingeschränkten Zugänglichkeit aufgrund der ausladenden Systemtechnik resultiert [17]. Im Hinblick auf das verwendete Zusatzmaterial ergeben sich durch die Verwendung von Draht jedoch signifikante Vorteile im Vergleich zu Pulver. Neben dem hohen Materialnutzungsgrad von 100 % und der damit einhergehenden sauberen Fertigungsumgebung ist das Zusatzmaterial kostengünstig und leicht verfügbar. Weiterhin lassen sich durch das drahtbasierte LMD hohe Oberflächengüten erzielen. Einen bedeutenden Schritt im Hinblick auf die industrielle Relevanz des drahtbasierten LMD stellen Entwicklungen von Bearbeitungsoptiken dar, welche durch eine geeignete Strahlformung eine coaxiale Drahtzufuhr

in der Mitte eines ringförmigen Strahlprofils ermöglichen [18]. Dieses Verfahrensprinzip ist in Abbildung 2b dargestellt. Hierdurch wird eine richtungsunabhängige Prozessführung in Verbindung mit den Vorteilen des drahtförmigen Zusatzmaterials erreicht, wodurch der Prozess ein hohes wirtschaftliches Potenzial aufweist [19, 20].

Das WAAM basiert auf dem Metall-Schutzgas-Schweißen. Bei diesem Prozess wird ein Metalldraht in der Prozesszone mittels eines Lichtbogens über die Schmelztemperatur hinaus erwärmt und auf ein Substrat aufgetragen (Abbildung 2c). Unter den betrachteten Verfahren zeichnet sich das WAAM in erster Linie durch die höchste Auftragsrate aus, wobei abhängig vom verwendeten Werkstoff Werte im Bereich von 8 kg/h erreicht werden können [21, 22]. Weiterhin sind nur vergleichsweise einfach umsetzbare Arbeitsschutzmaßnahmen erforderlich, da weder mit Metallpulver, noch mit hochenergetischer Laserstrahlung gearbeitet wird. Diese Vorteile des WAAM-Verfahrens gehen jedoch mit verhältnismäßig geringen Oberflächengüten und hohen Bauteiltoleranzen einher, weshalb die spanende Nachbearbeitung ein fester Teil der WAAM-Prozesskette ist [5]. Hierbei werden vornehmlich Fräsverfahren eingesetzt [6]. Insbesondere aufgrund der hohen Auftragsraten ergeben sich durch das WAAM vielfältige Potenziale für die industrielle Fertigung.

Aus den Vor- und Nachteilen der einzelnen DED-Verfahren wird deutlich, dass für eine großflächige Anwendung in der Fahrzeugproduktion eine umfassende Betrachtung aller dieser Verfahren notwendig ist. Dabei hängt die Wahl des verwendeten Prozesses für eine bestimmte Anwendung in erster Linie von den Anforderungen an die Genauigkeit, die Auftragsrate und die zulässige Umweltbelastung, beispielsweise infolge von Pulver-Emissionen, ab. Gleichzeitig muss eine effiziente Nachbearbeitung und eine geeignete Einbindung in die Prozesskette für alle DED-Verfahren sichergestellt werden, um das Potenzial dieser additiven Fertigungsverfahren vollumfänglich zu nutzen.

Zusammenfassend werden die DED-Verfahren infolge der rasch fortschreitenden Entwicklungen zunehmend relevant für den Einsatz in der automobilen Serienproduktion. Aufgrund der Neuheit des WAAM- sowie des drahtbasierten LMD-Verfahrens war das existierende Prozesswissen zu Beginn der Projektbearbeitung jedoch begrenzt, weshalb ein hoher Aufwand für die Einstellung und Parameterfindung sowie hochqualifiziertes Personal erforderlich war. Dem konnte im Rahmen der Projektbearbeitung durch eine Erhöhung der Prozessautonomie begegnet werden, wobei Methoden zur Inline-Prozessregelung in Verbindung mit der zuverlässigen Erfassung von Messdaten bei einer hochdynamischen Prozessführung, wie sie für einen wirtschaftlichen Einsatz der Verfahren notwendig ist, im Vordergrund standen. Dabei stellte die geeignete Nutzung von Daten, von der Erstellung und Optimierung der Konstruktion in der CAD-Datei über die Prozesssimulation, die ganzheitliche Datenerfassung, die Prozesssteuerung und -regelung bis hin zur Endbearbeitung der Bauteile, einen entscheidenden Faktor im Hinblick auf die erzielbare Bauteilqualität sowie die Wirtschaftlichkeit dar [23–25].

#### **1.4.2 Prozessregelung beim Laserauftragschweißen**

Der größere Teil der existierenden Arbeiten zur Prozessüberwachung sowie zur Prozessregelung beim LMD bezieht sich auf das pulverbasierte LMD, das die älteste und am weitesten beforschte Variante darstellt. Ein entscheidender Unterschied zur drahtbasierten Variante ist, dass immer nur ein Teil des Pulvers in das Schmelzbad aufgenommen wird und dadurch die Prozessstabilität aufgrund selbstregelnder Effekte tendenziell höher ist [26].

Das drahtbasierte LMD weist jedoch wesentliche Vorteile aus, wie einen Materialnutzungsgrad von 100 %, das Fehlen von gesundheitsschädlichem und anlagenverschmutzendem Metallstaub und das kostengünstige und leicht verfügbare Ausgangsmaterial [27]. Wie bereits in Abschnitt 1.4.1 erläutert, ist eine geeignete Prozessregelung von entscheidender Bedeutung, um das Verfahren industriell breiter einsetzen zu können. Insbesondere sind hier die Mehrgrößenregelungen hervorzuheben. Dies hängt mit der Tatsache zusammen, dass auftretende Bauteildefekte verschiedene voneinander unabhängige Ursachen haben, wie eine Überhitzung infolge eines Wärmestaus oder eine Abweichung der Höhenzustellung von der tatsächlichen Schichthöhe [28]. Um diese Störgrößen zu kompensieren, ist eine gleichzeitige Anpassung verschiedener Prozessparameter notwendig. Da zwischen den Prozessantworten üblicherweise starke Querkopplungen vorliegen, sind voneinander unabhängige Eingrößenregler nicht ausreichend für eine vollständige Prozessbeherrschung. Die Prozessregelung bzw. -automatisierung ist dabei untrennbar mit der Inline-Prozessdatenerfassung sowie der Datenaufbereitung und -auswertung verbunden.

In den vorangegangenen Arbeiten wurden bereits erste Ansätze für Mehrgrößenregelungen beim pulverbasierten [29, 30] sowie beim drahtbasierten [31] Laserauftragschweißen vorgestellt. Jedoch wurde eine echtzeitfähige Mehrgrößenregelung, insbesondere beim drahtbasierten Laserauftragschweißen, bis zur Bearbeitung von **AdDEDValue** nicht umgesetzt. Dies hängt in erster Linie mit der Tatsache zusammen, dass eine echtzeitfähige Messung der Schichthöhe aufgrund von Prozessemissionen und Abschattungseffekten durch den Draht eine große Herausforderung darstellt. Durch den Einsatz der OCT-Sensorik [32] kann dieser Herausforderung begegnet werden. Daneben existiert eine Vielzahl weiterer Sensorkonzepte mit einem hohen Potenzial für die Prozessdatenerfassung beim Laserauftragschweißen. Beispielsweise sind hier die Verwendung einer Hyperspektralkamera [33], eines optischen Mikrophons [34], eines Pyrometers oder einer Thermographiekamera [35, 36], eines Laser-Profilesensors [28] oder eines Kraftsensors an der Drahtvorschubeinheit [37] zu nennen.

### 1.4.3 Prozesssimulation und Bahnführung

Mehrere Autoren zeigten, dass durch die Fertigung mittels DED-Verfahren Bauteile mit mechanischen Eigenschaften ähnlich denen geschmiedeter Werkstoffe erreicht werden können [38, 39]. Dabei hängt das Gefüge direkt mit den makroskopisch-mechanischen Eigenschaften des Bauteils zusammen. Beispielsweise beobachteten Qiu et al. [40], dass die Anisotropie der mechanischen Eigenschaften beim WAAM vor allem durch die Dendritenarm-Abstände, die Versetzungsdichte und die Position der Ausscheidungen bestimmt wird. Des Weiteren wiesen Yi et al. [41] darauf hin, dass vor allem die Abkühlrate während und nach dem Schweißprozess die Ausbildung der Mikrostruktur und somit die mechanischen Eigenschaften signifikant beeinflusst. Zhu et al. [42] entdeckten neue  $\gamma/\gamma$ -Lamellengrenzen in der Mikrostruktur von WAAM-gefertigten Proben aus Aluminium-Titan-Legierungen, die bei konventionellen Fertigungsverfahren bisher nicht bekannt waren. Die Entstehung der neuen mikrostrukturellen Eigenschaften begründeten die Autoren durch das zyklische Schmelzen und Erstarren des Werkstoffs der unterliegenden Schichten, das bei konventionellen Verfahren so nicht auftritt.

Aus den Untersuchungen geht hervor, dass Gefügeentwicklungen während des Erstarrungsprozesses die mechanischen Eigenschaften des Bauteils maßgeblich beeinflussen. Ebenfalls konnte festgestellt werden, dass das Gefüge des Bauteils hauptsächlich von seiner Temperaturhistorie abhängt. Die Kenntnis über die Bauteiltemperatur während der DED-Prozesse spielt

damit eine zentrale Rolle für das Verständnis und die Verbesserung der Qualität additiv gefertigter Bauteile.

Wu et al. [43] führten zum WAAM-Prozess mit dem Werkstoff Ti6Al4V Temperaturmessungen mittels eines Infrarot-Pyrometers und Thermoelementen durch und stellten fest, dass hohe Prozesstemperaturen sowohl die Prozessstabilität als auch die erreichbare Formtreue maßgeblich verringern. Eine Steuerung der Prozesstemperatur wurde empfohlen. Yang et al. [44] untersuchten mit einer Infrarot-Kamera die Temperatur im WAAM-Prozess für den Auftrag von Stahl. Auch hier wurde die Prozesstemperatur als wichtiger Faktor für die Formtreue identifiziert.

Neben den bisher genannten experimentellen Untersuchungen der Prozesstemperaturen wurden auch simulative Ansätze verfolgt. Die Simulation bietet den Vorteil, dass Bauteileigenschaften während und nach dem WAAM-Prozess bereits vor der Fertigung prognostiziert und analysiert werden können. Ding et al. [45] und Camon et al. [46] simulierten mittels der Finite-Elemente-Methode den Bauteilverzug bei einfachen WAAM-gefertigten Wänden. Li und Xiong [47] führten thermomechanische Simulationen zu einer Zylindergeometrie mit unterschiedlichen Wartezeiten zwischen den Schichten durch. Die Autoren stellten fest, dass thermisch induzierte Eigenspannungen in der Substratplatte durch erhöhte Wartezeiten und niedrige Prozesstemperaturen erreicht werden können.

Die vor der Bearbeitung des Forschungsprojekts **AdDEDValue** durchgeführten Untersuchungen zu Prozesstemperaturen stützen sich auf räumlich gemittelte Durchschnittstemperaturen oder auf bestimmte Messpunkte im Bauteil. Dabei verliert die Zwischenlagentemperatur mit der Größe des Bauteils zunehmend an Aussagekraft, da die Bauteiloberfläche lokal unterschiedliche Temperaturverläufe und Abkühlverhalten aufweisen kann. Eine Forschungslücke war daher eine adaptive Bahnplanung, welche beispielsweise den Schweißstartpunkt jeder Schicht immer an Stellen mit geeigneten vorherrschenden Temperaturen setzt. Erste Konzepte zur Bahnplanung auf Basis von Simulationsergebnissen wurden von Bähr et al. [48] untersucht. Dabei stellten die Autoren eine Methode zur optimierten Bahnplanung anhand einer zweidimensionalen Wabengeometrie vor. Das Bauteil wurde zunächst in kleine Schweißabschnitte unterteilt und mit unterschiedlichen Schweißreihenfolgen thermisch simuliert. Anhand der Simulationsergebnisse wurde der Schweißpfad iterativ angepasst.

Zusammenfassend wurden vor der Bearbeitung von **AdDEDValue** folgende Schlüsse aus dem Stand der Technik gezogen: Die Temperaturhistorie hat einen entscheidenden Einfluss auf die Formgebung, die Mikrostruktur und somit auch auf die mechanischen Eigenschaften von DED-Bauteilen. Daher ist ein ausgereiftes prozessorientiertes Temperaturmanagement essenziell für die industrielle Skalierbarkeit des WAAM-Verfahrens im industriellen Maßstab. Zum Temperaturmanagement von komplexen Bauteilen eignen sich simulativ gestützte Bahnplanungskonzepte, die bisher nur bei einfachen Geometrien und Testbauteilen zum Einsatz gekommen sind.

#### 1.4.4 Prozessplanung zur spanenden Nachbearbeitung

Während auf dem Gebiet der Nachbearbeitung von durch das Laser-Strahlschmelzen (engl.: Powder Bed Fusion of Metals Using a Laser Beam, PBF-LB/M) gefertigte Bauteilen bereits viele Untersuchungen zu Materialverhalten, der notwendigen Abtragstiefe und der Einbindung in die Prozesskette durchgeführt wurden, ist die Prozessplanung zur Nachbearbeitung DED-gefertigter Komponenten wenig beforscht. Vorhandene Publikationen auf dem Gebiet gehen **AdDEDValue**

häufig von einer hybriden Anlage aus, in der die Fräsbearbeitung nach jeder Schicht durchgeführt wird. Li et al. [49] nutzten beispielsweise dieses Prinzip zur Fertigung von Paneelen mit Versteifungen für den Flugzeugbau. Für eine sequentielle Prozesskette wurde in vorangegangenen Arbeiten am *iwb* (siehe Abschnitt 1.2) eine Methode zur Berechnung der notwendigen Abtragstiefe zur Fertigung einer funktionalen Oberfläche entwickelt [4]. Mit der entwickelten Methode kann die Abtragstiefe mit wenigen Versuchen ermittelt werden. Allerdings muss die Untersuchung für jede DED-Parameterkombination durchgeführt werden.

Bei der Zerspanung von Bauteilen aus Ti6Al4V, gefertigt mit einem plasmabasierten DED-Verfahren, wurde ein frühzeitiger Werkzeugbruch detektiert [50]. Zurückzuführen war dieser auf den Einfluss des Schweißprozesses auf die Mikrostruktur des Bauteils. Dies zeigt, dass der Einfluss des DED-gefertigten Rohteils in der Prozessplanung berücksichtigt werden sollte. Durch den oft großen Verzug der Bauteile wird die Aufspannung und die Ausrichtung der Bauteile außerdem erschwert, was zu einem erhöhten Aufwand beim Rüsten für die Nachbearbeitung führt.

#### 1.4.5 Simulationsgestützte roboterbasierte Nachbearbeitung

Aufgrund der außergewöhnlichen Flexibilität und der breiten Einsatzmöglichkeit in industriellen Fertigungsprozessen verspricht der Einsatz von Industrierobotern zum Fräsen für ausgewählte Anwendungen eine deutliche Steigerung der Wirtschaftlichkeit gegenüber konventionellen Bearbeitungszentren [51, 52]. Derartige Fräsroboter können auch großvolumige Bauteile bearbeiten und weisen dabei vergleichsweise günstige Beschaffungskosten auf. Aufgrund der geringeren statischen Steifigkeit wird der Fräser durch die wirkenden Prozesskräfte abgedrängt und verfehlt damit mitunter die hohen Anforderungen an die Formgenauigkeit des Werkstücks [53]. Zudem sind Fräsroboter deutlich anfälliger für dynamische Instabilitäten aufgrund von Anregungen durch den Fräsprozess [54].

Zur Vermeidung derartiger Fehlerfälle kann das Roboterverhalten vorab modelliert und eine präventive Kompensationssteuerung vorgelagert werden [55]. Um die Genauigkeit dieser Steuerung sicherzustellen, kommen der notwendigen Systemidentifikation und Modellbildung eine hohe Bedeutung zu [56]. Aufgrund der seriellen Kinematik erweist sich die klassische Modellbildung der Strukturdynamik von Fräsrobotern als schwierig. Die Anwendung von modernen maschinellen Lernverfahren verspricht dabei eine einfachere und genauere Modellierung [57]. In vorangegangenen Arbeiten wurden die strukturdynamischen Modelle über die messtechnische Erfassung der statischen, translatorischen Nachgiebigkeit des Tool-Center-Points kalibriert (beispielsweise [58]).

#### 1.4.6 Schutzrechte

In den Bereichen der Fertigung mittels DED-Verfahren, des roboterbasierten Fräsens und der Nachbearbeitung von DED-gefertigten Bauteilen existierten zu Projektbeginn einige für das Projekt relevante Patente. Im folgenden Abschnitt sind die das Projekt betreffenden Schutzrechte und Patente aufgeführt.

- Schutzrecht DE102019113668A1 schützt ein Verfahren zum lagenweisen Aufbau eines additiv gefertigten Formkörpers. Dabei kommt ein optisches und ein schallbasiertes Messsystem zur Erfassung der Ist-Geometrie während des Aufbauprozesses zum Einsatz.

- Schutzrecht DE102017108031A1 umfasst ein Verfahren und die zugehörige Fertigungseinrichtung zum lagenweisen Aufbau. Nach dem Auftrag jeder Lage wird hier ein Zerspanungsvorgang durchgeführt.
- Schutzrecht DE 102016105162 A1 beschreibt eine Anlage zur additiven Fertigung metallischer Körper. Dabei wird eine aktive Kühlung mittels Kühlgranulat und Wärmeübertragungsfluid eingesetzt.
- Schutzrecht DE102015122135A1 betrifft ein Verfahren, bei dem mindestens zwei metallische Werkstoffe mittels Auftragsschmelzen zum Aufbau eines Bauteils genutzt werden.
- Schutzrecht DE102007018400B4 beschreibt ein optisches System für einen Lasermaterialbearbeitungskopf. Dieses ermöglicht die Erzeugung eines Ringstrahlungsfeldes, sodass Prozessmittel coaxial zur optischen Achse zugeführt werden können.
- Die Firma Norsk Titanium hält einige Schutzrechte im Bereich WAAM (bspw. Schutzrecht AU 2012233752 B2) und Anlagentechnik für WAAM (bspw. Schutzrecht WO 2018/007031 A1). In den Anlagen kommt ein Plasmalichtbogen zum Einsatz.

Im Rahmen des Projektes **AdDEDValue** wurde keines der angeführten Patente oder Schutzrechte verletzt.

## 1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

### 1.5.1 Arbeitsteilung innerhalb des Projektes

Um die umfangreichen Ziele des Forschungsprojekts zu erreichen, war eine organisierte Arbeitsteilung und Koordination zwischen den Partnern notwendig.

Die Rolle des Konsortialführers wurde dabei von der Fritz Automation GmbH übernommen. Dabei zählten die federführende Projektorganisation, die Bewertung der industriellen Umsetzbarkeit sowie die technische Validierung der Produktionssysteme zu den zentralen Aufgaben.

Aufgrund der Größe und Zusammensetzung des Konsortiums wurden projektinterne, themenspezifische Arbeitskreise (Digitalisierung, Systemtechnik, Prozessführung) gebildet, wobei die TUM als zusätzlicher Koordinator auftrat.

### 1.5.2 Zusammenarbeit mit Dritten

Im Projekt wurde mit der Precitec GmbH & Co. KG als assoziiertem Partner eng zusammengearbeitet. Precitec ist Experte für die Herstellung von Komponenten und Systemlösungen im Bereich der Lasertechnik und der optischen Messtechnik und arbeitet an der Weiterentwicklung der OCT-Sensorik für das pulverbasierte sowie das drahtbasierte LMD. Der Einsatz der Sensorik für diese laserbasierten DED-Prozesse wurde in enger Zusammenarbeit mit den Konsortialpartnern, insbesondere mit der TUM, evaluiert. Im Zuge dessen wurde auch die Kombinierbarkeit der OCT-Sensorik mit weiteren Sensortypen (Pyrometrie, Hyperspektralkamera, Laserscanning, optisches Mikrophon etc.) untersucht. Die Firma EMAG unterstützte das Konsortium als Integrator für Lasertechnik in Produktionsmaschinen für die automobilen Serienfertigung und im Speziellen beim Aufbau einer Demonstrationsmaschine und der Integration von Sensorik.

Um die Breitenwirkung des Projektes zu erhöhen, erfolgte während der Laufzeit ein intensiver Austausch und eine enge Zusammenarbeit mit weiteren Unternehmen und Forschungseinrichtungen außerhalb des Konsortiums (siehe Abschnitt 2.2).

Die Sichtbarkeit des Projektfortschritts sowie der Ergebnisse in der Industrie wurde durch das Einbeziehen von Herstellern der im Projekt benötigten Systemtechnik zusätzlich erhöht. Die Hersteller standen in vielen Fällen bereits mit den Konsortialpartnern in Verbindung und wirkten im Projekt bei Umbauten, Inbetriebnahmen oder der Datenauswertung mit. Seitens AGCO wurde der Fendt-Werksverbund miteinbezogen, um das konzernweite Bewusstsein für die beforschten innovativen Technologien zu stärken. Zudem sollte eine Weitergabe des Know-hows an Zulieferer sowie der Aufbau und die Qualifizierung neuer Zulieferer erfolgen.

An der TUM wurde zudem der fachliche Austausch mit weiteren Instituten und Lehrstühlen gesucht, beispielsweise dem Lehrstuhl für Werkstofftechnik der Additiven Fertigung (Prof. Dr. Peter Mayr), dem Lehrstuhl für Metallbau (Prof. Dr.-Ing. Martin Mensinger) oder dem Lehrstuhl für Computergestützte Modellierung und Simulation (Prof. Dr.-Ing. André Borrmann).

## 2 Eingehende Darstellung

### 2.1 Verwendung der Zuwendung und Arbeitsergebnisse des Teilprojektes

Die Zuwendung des Projekts **AdDEDValue** ist in Tabelle 1 aufgeschlüsselt. Der größte Teil der Mittel wurde für die Gehälter der wissenschaftlichen Mitarbeitenden verwendet.

Tabelle 1: Finanzübersicht

Pos.	Bezeichnung	Zuwendung lt. Änderungsbescheid vom 11.09.2024 in €	Ausgaben in €	Differenz in €
0812	Beschäftigte E12-E15	632.980,00	650.097,81	-17.117,81
0822	Beschäftigungsentgelte	70.050,00	73.564,38	-3.514,38
0831	Gegenstände bis 800/410/400 €	9.000,00	6.918,98	2.081,02
0834	Mieten und Rechnerkosten	0,00	0,00	0,00
0835	Vergabe von Aufträgen	20.825,00	19.337,50	1.487,50
0843	Sonstige allgemeine Verwaltungsausgaben	35.000,00	38.671,14	-3.671,14
0846	Dienstreisen	14.300,00	13.577,75	722,25
0850	Gegenstände & andere Investitionen > 800/410/400 €	235.145,00	235.586,06	-441,06
0861	Gesamtausgaben	1.017.300,00	1.037.753,62	-20.453,62
0864	Bundesmittel	1.017.300,00	1.037.753,62	-20.453,62

Während der Projektlaufzeit konnten alle vorgegebenen Ziele (siehe Abschnitt 1.1) vollständig erreicht werden. Die hierfür durchgeführten Arbeiten und die erzielten Arbeitsergebnisse sind im Folgenden detailliert beschrieben (AP 1.2, 2.1, 2.3, 3.1, 3.2, 4.2–8.1, 8.3, 8.4). Eine Erläuterung der Arbeiten der Projektpartner (z. B. AP 1.1, 2.2, 2.4, 4.1, 8.4) sind in deren Schlussberichten zu finden. Weitere Ausführungen und technische Details sind den diversen im Rahmen des Projektes entstandenen wissenschaftlichen Veröffentlichungen (siehe Abschnitt 2.2.3) zu entnehmen.

## Arbeitspaket 1: Anforderungsspezifikation und Projektmanagement

### Arbeitspaket 1.2: Projektcontrolling

Dieses AP beinhaltete das *iwb*-interne Projektmanagement und -controlling sowie die übergeordnete Projektkoordination. Herr Fritz von der Fritz Automation GmbH wurde in seinen Aufgaben als Konsortialführer durch das *iwb* über die gesamte Projektlaufzeit unterstützt, beispielsweise bei der Organisation und Durchführung von regelmäßigen Abstimmungs- und Konsortialtreffen. Das AP diente der Sicherung des Erreichens der *iwb*-internen Projektziele sowie der Projektziele des Verbundes. Für das Erreichen der Ziele war eine intensive Zusammenarbeit mit den Verbundpartnern erforderlich. In den Abstimmungs- und Konsortialtreffen wurde der Projektfortschritt festgehalten und es wurden weitere Schritte festgelegt. Diese Schritte gingen in die Bearbeitung der betreffenden AP ein. Zusätzlich wurden in AP, in denen eine enge Kooperation mit den Partnern erforderlich war, regelmäßige bilaterale Abstimmungs- und Übergabetermine abgehalten.

Zielerreichung: Die Ziele dieses AP laut Projektantrag waren die übergeordnete Projektkoordination (Organisation der regelmäßigen Abstimmungstreffen durch das *iwb*) und die Absicherung des Projektfortschritts und der definierten Projektziele. Das Ziel dieses AP wurde mit dem Abschluss des Projektes erreicht.

## **Arbeitspaket 2: DED-Prozessentwicklung**

### **Arbeitspaket 2.1: Analyse der vorhandenen Anlagentechnik**

In diesem AP wurden zunächst die systemtechnischen Komponenten der vorhandenen DED-Versuchsanlagen einzeln und in ihrer Gesamtheit im Hinblick auf ihre Leistungsdaten bewertet. Zu den Komponenten zählten beim drahtbasierten LMD unter anderem die Laserstrahlquelle, die Bearbeitungsoptik, die Drahtfördereinheit, der verwendete Industrieroboter mit der zugehörigen Robotersteuerung und die verwendete speicherprogrammierbare Steuerung (SPS). Beim WAAM waren in erster Linie die Schweißstromquelle, der verwendete Industrieroboter und die SPS relevant.

Ein wesentlicher Bestandteil dieses AP war die Erstellung einer umfassenden Tabelle in Zusammenarbeit mit den anderen Anwendungspartnern (Volkswagen AG, applicationtechnology GmbH & Co. KG, Siemens AG), in der alle vorhandenen Anlagen mit ihren Einzelkomponenten erfasst und gegenübergestellt wurden. Hierbei wurden insbesondere auch die vorhandenen Sensoren zur Prozessüberwachung erfasst und die jeweils erforderliche Rechenleistung zur Erfassung der Prozessdaten sowie für die echtzeitfähige Prozessregelung eingeordnet. Im Hinblick auf die in den nachfolgend beschriebenen AP durchgeführten Untersuchungen am *iwb* stellte sich heraus, dass der kurz vor Projektbeginn für beide Anlagen installierte Industrie-PC (C6030, Beckhoff Automation GmbH & Co. KG) bereits über eine ausreichende Rechenleistung verfügte. Zudem wurden weitere vielversprechende Sensoren zur Prozessüberwachung beim drahtbasierten LMD identifiziert (siehe AP 3), mit welchen ein zusätzlicher Informationsgewinn zu erwarten war. Außerdem wurde mit der Fritz Automation GmbH ein Ortstermin am *iwb* abgehalten, um die Anlagendaten und die aktuelle Elektroplanung detailliert zu erfassen.

Strahlvermessungen mit dem im Rahmen des Projektes angeschafften Messgerät zur Strahlanalyse (FocusMonitor FM+, PRIMES GmbH) gaben zudem Aufschluss über die Strahlqualität und die Intensitätsverteilung, was eine wichtige Grundlage für die weiterführenden Untersuchungen zum drahtbasierten Laserauftragschweißen darstellte.

Zielerreichung: Das Ziel dieses AP war die Analyse der an der TUM vorhandenen Versuchsanlage zum drahtbasierten LMD und zum WAAM im Hinblick auf die in AP 1.1 (ohne Beteiligung der TUM) ermittelten Anforderungen an die Systemtechnik. Dieses Ziel wurde mit dem Abschluss des AP erreicht.

### **Arbeitspaket 2.3: Prozessskalierung und Prozessentwicklung**

In diesem AP wurden Prozessuntersuchungen zum drahtbasierten LMD durchgeführt, wobei die Auswirkungen der Prozessparameter und der Prozessrandbedingungen auf die resultierenden Bauteileigenschaften evaluiert wurden. Dabei wurde insbesondere auch die Prozessskalierung im Hinblick auf höhere Auftragsraten untersucht.

Zunächst wurde ein Vorgehen für den prozesssicheren Aufbau massiver Bauteile erarbeitet, wobei auf bestehendem Prozesswissen aus vorhergehenden Untersuchungen zu einzelnen Schweißraupen und dünnwandigen Strukturen aufgebaut werden konnte. Es wurde eine Methodik zur Einstellung des Bahnabstandes innerhalb einzelner Lagen im Hinblick auf eine minimale Welligkeit entwickelt. Hierfür wurde der Bahnabstand bei verschiedenen Auftragsraten variiert und eine Punktwolke des Oberflächenprofils der entstehenden Schichten erfasst. Die Standardabweichung der z-Koordinaten der Punkte diente als Maß für die Welligkeit, welche somit für individuelle Parametersätze minimiert werden konnte. In Verbindung mit einem mäandernden Auftragsmuster, angepassten Überschleifparametern des verwendeten Industrieroboters und einem geeigneten Höheninkrement konnten massive Probekörper defektfrei aufgebaut werden. In Abbildung 3 sind die Abhängigkeit der Welligkeit vom Bahnabstand sowie ein mit dem beschriebenen Vorgehen aufgebautes massives Bauteil dargestellt.

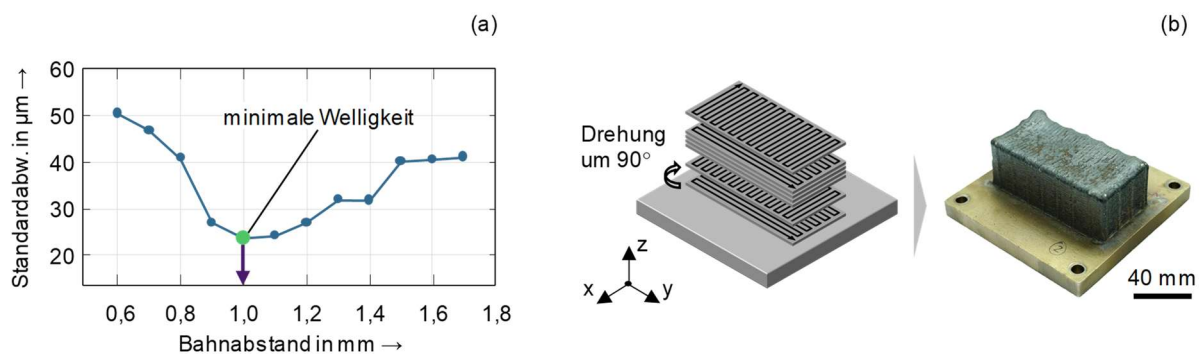


Abbildung 3: Aufbau massiver Bauteile durch das drahtbasierte LMD: (a) Minimierung der Oberflächenwelligkeit, (b) Auftragsmuster und gefertigtes Bauteil

Basierend auf dem erarbeiteten Vorgehen wurden anschließend massive Quader aus Edelstahl (316L) bei verschiedenen thermischen Randbedingungen aufgebaut, um den Einfluss der thermischen Geschichte auf die resultierenden Bauteileigenschaften untersuchen zu können. Hierbei wurden Substrattemperaturen von 20 °C und 500 °C bei Prozessbeginn verglichen.

Die Proben wurden metallographisch präpariert und anhand von Mikroskopaufnahmen im Hinblick auf ihre Mikrostruktur untersucht. Es wurde eine überwiegend kolumnar-dendritische Mikrostruktur festgestellt, wobei die jeweils oberste Schicht ein äquiaxiales dendritisches Gefüge zeigte. Dieses äquiaxiale Gefüge wurde während des Auftrags der folgenden Schichten zyklisch erwärmt, was in der Ausbildung eines kolumnaren Gefüges unterhalb der obersten Schichten resultierte.

Die Veränderung der mikrostrukturellen Größenskala mit zunehmender Bauhöhe konnte anhand des primären Dendritenarmabstandes (PDAS) quantifiziert werden. In beiden Konfigurationen stiegen die PDAS-Werte mit zunehmender Bauhöhe an, was eine Vergrößerung der Mikrostruktur anzeigte. Für den auf der vorgeheizten Substratplatte aufgebauten Quader waren die PDAS-Werte durchweg höher. Basierend auf den PDAS-Werten konnten die im Prozess vorherrschenden Abkühlraten berechnet werden. Die Abkühlraten wurden mit zunehmender Bauhöhe geringer, was auf einen Wärmestau im Bauteil zurückgeführt werden konnte. Zudem waren die Abkühlraten in der Konfiguration mit vorgeheizter Substratplatte geringer.

Weiterhin wurde die Vickershärte in den Querschliffen der Proben gemessen, wofür das im Rahmen des Projektes angeschaffte Mikrohärteprüfgerät (Qness 60 A+ EVO, ATM Qness GmbH) verwendet wurde. Für beide Konfigurationen zeigte sich eine Verringerung der Härte mit zunehmender Bauhöhe, wobei die auf der vorgeheizten Substratplatte aufgebaute Probe durchweg geringere, aber weniger stark variierende Werte aufwies. Die Abhängigkeit zwischen der Härte und der Mikrostruktur konnte quantitativ mittels der Hall-Petch-Beziehung beschrieben werden. Weiterhin wurden den aufgebauten Quadern Zugproben bei verschiedenen Bauhöhen entnommen. Die Zugeigenschaften (Zugfestigkeit, Streckgrenze und Bruchdehnung) nahmen analog zur Härte in beiden Fällen mit zunehmender Bauhöhe ab. Bei der Bruchdehnung wurden signifikante Unterschiede zwischen den Proben festgestellt. Die vorgeheizte Substratplatte führte zu deutlich geringeren Bruchdehnungen, was auf einen größeren Anteil an Oxideinschlüssen infolge der höheren Temperaturen zurückgeführt wurde.

Zusammenfassend war ein erhöhter Wärmestau in den Bauteilen mit einem gleichmäßigerem, aber gröberem Gefüge und verminderten mechanischen Eigenschaften verbunden. Die Ergebnisse bieten eine wichtige Grundlage, um die Eigenschaften von additiv gefertigten Bauteilen zukünftig auf spezifische Anforderungen anzupassen. Ein Auszug der Arbeiten und der Ergebnisse ist in Abbildung 4 dargestellt.

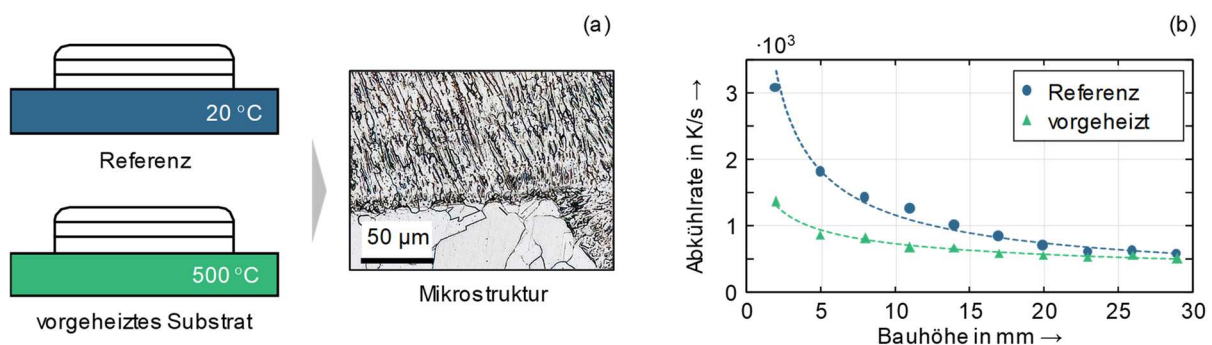


Abbildung 4: Charakterisierung von Bauteilen aus Edelstahl 316L: (a) Aufbau bei verschiedenen Substrattemperaturen und Evaluierung der Mikrostruktur, (b) bauhöhenabhängige Abkühlraten

Um die Schutzgasabdeckung während des Prozesses zu verbessern und damit die Bildung von Oxidschichten zu unterdrücken, wurde eine speziell für das koaxiale drahtbasierte Laser-auftragschweißen angepasste Schutzgasdüse entwickelt. Durch die Verwendung einer lokalen Schutzgasdüse konnte eine aufwändige Umhausung der Anlage zur Erzeugung einer vollständigen Schutzgasatmosphäre vermieden werden. Die Schutzgasdüse wurde im Hinblick auf gute Zugänglichkeit bei einer großen Bandbreite von Anwendungen sowie auf eine gleichzeitig großflächige Schutzgasabdeckung ausgelegt. Dabei sollte möglichst geringe Turbulenz am Düsenausgang auftreten. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, wurden Gestaltungsrichtlinien für Windkanäle angewendet und das Düsendesign basierend auf CFD-Simulationen iterativ angepasst. Das finale Design bestand aus zwei Teilen, welche nachfolgend als Adapter und Düse bezeichnet werden (siehe Abbildung 5). Der Adapter wurde mittels PBF-LB/M gefertigt, was die Einbringung komplexer innenliegender Kühlkanäle ermöglichte. Die Düse wies ein Kontraktionsverhältnis von 5,76 auf, was einen geeigneten Kompromiss zwischen großflächiger Abdeckung und ausreichender Zugänglichkeit darstellte. Zusätzlich wurde der Düse ein Gleichrichter in Form von 54 Bohrungen überlagert, was den abgedeckten Bereich zusätzlich vergrößerte, ohne Turbulenz einzubringen.



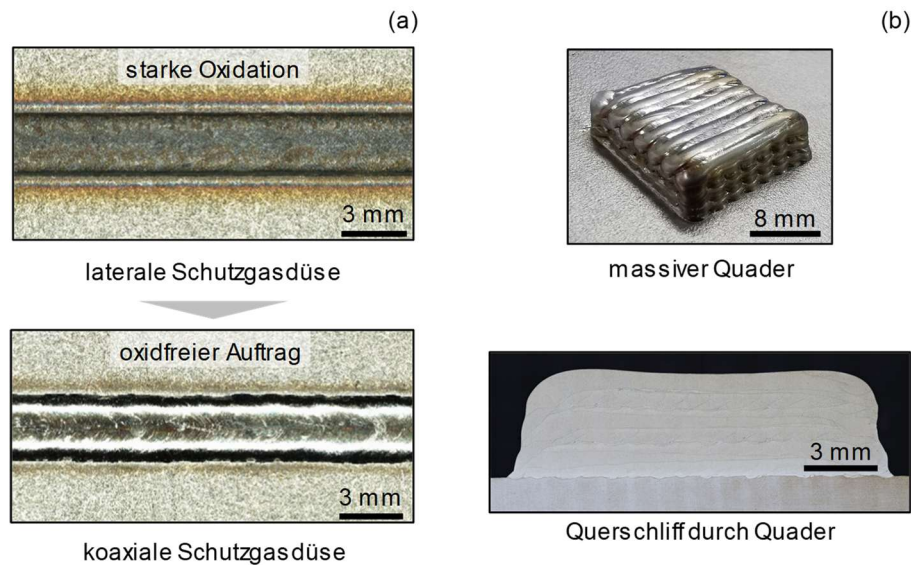


Abbildung 6: Wirkung der Schutzgasdüse: (a) Vergleich mit ursprünglicher lateraler Düse bei einer Durchflussrate von jeweils 30 l/min, (b) aufgebauter Quader ohne sichtbare Oxidation

Im Hinblick auf die Prozessskalierung wurde der Einfluss der Auftragsrate auf die Prozessstabilität untersucht, wobei die in AP 6.1 entworfene Temperaturregelung angewendet wurde. Hierbei wurde bei Drahtvorschubgeschwindigkeiten von 0,5 m/min, 1,0 m/min und 1,5 m/min jeweils der Bereich an Schmelzbadtemperaturen ermittelt, bei denen der Auftrag defektfreier Schweißraupen möglich war. Dieser Bereich vergrößerte sich mit zunehmender Auftragsrate in Richtung höherer Schmelzbadtemperaturen. Dies war der Fall, da ein größerer Teil der zugeführten Energie zum Aufschmelzen des Materials verwendet wurde und somit ein höherer Energieeintrag nicht zur typischen Tropfenbildung führte. Das ermittelte Prozessfenster ist in Abbildung 7 gezeigt.

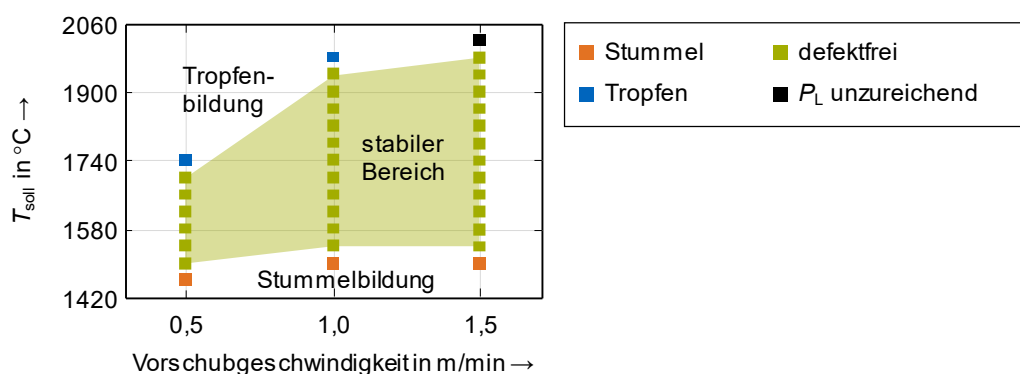


Abbildung 7: Schmelzbadtemperaturabhängiges Prozessfenster bei verschiedenen Auftragsraten; die Drahtvorschubgeschwindigkeit entsprach jeweils der Bahnvorschubgeschwindigkeit.

**Zielerreichung:** Die Ziele dieses AP waren die detaillierte Untersuchung der relevanten Prozessparameter auf die Prozessstabilität sowie die Bauteileigenschaften und die Ableitung eines geeigneten Prozessfensters. Weiteres Ziel war die Erforschung und Bewertung des Einflusses der Prozessrandbedingungen. Mit dem Abschluss des AP wurden diese Ziele erreicht und durch die Konstruktion der Schutzgasdüse sogar übererfüllt.

## Arbeitspaket 3: Sensorsystem

### Arbeitspaket 3.1: Auswahl und Entwicklung der Sensorsysteme

In diesem AP wurden zunächst in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern, insbesondere der applicationtechnology GmbH & Co. KG und der Fritz Automation GmbH, relevante Messgrößen identifiziert, wobei seitens der TUM umfangreiche Kenntnisse aus dem Bereich der DED-Verfahren sowie der Lasermaterialbearbeitung eingebracht wurden. Basierend auf einer Literaturrecherche wurde eine erste Bewertung des Informationsgewinns verschiedener Messsignale durchgeführt.

Im Anschluss wurden ausgewählte Sensorsysteme anhand von In-situ-Untersuchungen hinsichtlich ihres Potenzials für die Datenerfassung beim drahtbasierten Laserauftragschweißen evaluiert. Tabelle 2 bietet einen Überblick über die untersuchten Sensoren und deren Bewertung.

Tabelle 2: Sensorsysteme zur Prozessüberwachung beim Laserauftragschweißen; im weiteren Projektverlauf verstärkt betrachtete Sensoren sind in der Tabelle hervorgehoben.

Sensorsystem	Beschreibung	Bewertung
<b>Pyrometer</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- koaxiale Einbindung in Laser-optik</li> <li>- Überwachung der Schmelzbadtemperatur</li> </ul>	<b>hohes Potenzial zur Echtzeit-Prozessüberwachung</b>
Thermographiekamera	Überwachung der Bauteil- und Substrattemperaturen	Inline-Nutzung der Daten mit hohem Aufwand verbunden
Hyperspektralkamera	Überwachung der Schmelzbadtemperatur	hoher Aufwand für Signalinterpretation und Ableiten von Absoluttemperaturen herausfordernd
<b>Laserlinienscanner</b>	<b>Erzeugung einer Punktwolke der Bauteiloberfläche nach dem Auftragen einzelner Schichten</b>	<b>geeignet zur hochgenauen Erfassung des Oberflächenprofils</b>
<b>Optische Kohärenztomographie (OCT)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- koaxiale Einbindung in Laser-optik</li> <li>- Überwachung der Schweißraupengeometrie in Echtzeit</li> </ul>	<b>hohes Potenzial zur Echtzeit-Prozessüberwachung</b>
Laser Welding Monitor (LWM)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- koaxiale Einbindung in Laser-optik</li> <li>- Erfassung optischer Emissionen verschiedener Wellenlängen mittels Photodioden</li> </ul>	ermöglicht Aussagen über Prozessstabilität, aber geringer zusätzlicher Informationsgewinn

<b>Schweißkamera</b>	<b>Überwachung der Schmelzbaddynamik</b>	<b>signifikanter Mehrwert im Hinblick auf Echtzeit-Prozesszonenüberwachung durch bedienende Person</b>
Drahtvorschubeinheit	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Messung der axial auf den Draht wirkenden Kraft über den Motorstrom</li> <li>- Detektieren von Kontaktverlust zwischen Draht und Werkstück</li> </ul>	ermöglicht Erkennen von unzureichendem Energieeintrag (Draht stößt auf Schmelzbadboden)
Optisches Mikrophon	Erfassung hochfrequenter akustischer Prozessemissionen	nur stark ausgeprägte Defekte detektierbar und hoher Aufwand für Integration der Systemtechnik
<b>Widerstandssensor</b>	<b>Erfassung von Veränderungen des elektrischen Draht- und Bauteilwiderstandes während des Bauprozesses</b>	<b>veränderlicher Widerstand über die Bauteilhöhe, ermöglicht Aussagen über Prozessstabilität bei geringem Aufwand und geringen Kosten</b>

Wie aus obiger Tabelle hervorgeht, erwiesen sich von den untersuchten Sensorsystemen insbesondere das Pyrometer, der Laserlinienscanner, der OCT-Sensor und die Schweißkamera als geeignet für die Prozessüberwachung. Mit den drei erstgenannten Systemen wurden im weiteren Projektverlauf automatisierte Prozessregelungen realisiert (siehe AP 6). Weiterhin lieferten die aus der Drahtvorschubeinheit und dem Widerstandssensor erhaltenen Signale zusätzliche Informationen, die Rückschlüsse auf die Prozessstabilität zuließen.

Zielerreichung: Die Ziele des AP laut Projektantrag (Identifikation relevanter Messgrößen und Bewertung existierender Sensorkonzepte) wurden vollständig erreicht.

### Arbeitspaket 3.2: Sensorapplikation

In diesem AP wurden geeignete Messstrategien untersucht, wobei der Fokus auf dem Laserlinienscanner und dem OCT-Sensor lag. Für den Laserlinienscanner waren zunächst geeignete Messeinstellungen festzulegen, um nach dem Auftrag einzelner Schichten eine zuverlässige Erfassung der Bauteiloberfläche zu gewährleisten. Hierbei musste beispielsweise die Frequenz der Erfassung des Linienprofils auf die Robotergeschwindigkeit während des Messvorgangs abgestimmt werden, um einen definierten lateralen Abstand der Messpunkte zu gewährleisten. Die erfasste Punktwolke wurde durch ein C++-Programm als CSV-Datei im internen Speicher des Industrie-PCs (IPC) gespeichert. Dies stellte die Grundlage für die weitere Datenverarbeitung mittels der Software MATLAB dar (siehe AP 4).

In einem weiteren Schritt wurde der OCT-Sensor von Precitec in den verwendeten Drahtauftragskopf (CoaxPrinter) integriert, was erstmals eine koaxiale Erfassung von Abstandsinformationen im Bereich um das Schmelzbad in Echtzeit ermöglichte. Der OCT-Messspot wurde dabei scannerbasiert in der Prozesszone positioniert. Zunächst waren die verschiedenen Subsysteme zu kalibrieren und geeignete Messeinstellungen zu ermitteln. Im Hinblick auf die

Messspot-Position wurden Messungen im Vorlauf, im Nachlauf und mit kontinuierlich umlaufendem Messspot untersucht, wobei letztere den größten Informationsgewinn versprachen und damit eine wichtige Grundlage für die Dateninterpretation in AP 4.4 darstellten. Für die in AP 6 implementierte Höhenregelung erwies sich eine Messung im Vorlauf als geeignet.

Zielerreichung: Die Ziele des AP waren die Befähigung der *iwb*-Anlage zur Erfassung der relevanten Geometriemerkmale in der Prozesszone. Weiter sollten geeignete Strategien für eine hochaufgelöste Prozesszonenerfassung beim WAAM evaluiert werden. Diese Ziele wurden durch die Integration des Laserlinienscanners und des OCT-Sensors vollständig erreicht.

## Arbeitspaket 4: Datenhaltung und -auswertung

### Arbeitspaket 4.2: Datenmodellierung

In diesem AP wurden die auftretenden Datenquellen identifiziert und beschrieben (siehe AP 3). Das *iwb* unterstützte dabei insbesondere die Partner mit Expertenwissen zu den untersuchten Fertigungsprozessen.

Im Hinblick auf die spezifischen Anlagen am *iwb* wurden die vorhandenen Datenquellen mit ihren Ein- und Ausgangsgrößen erfasst und dokumentiert. Dabei wurden neben den Sensordaten (siehe AP 3) auch Maschinendaten wie die Roboterposition und -geschwindigkeit miteinbezogen. Weiterhin wurden die einzelnen Datenquellen und deren Beziehungen analysiert. Dies bildete die Grundlage für die Datenaufbereitung und -interpretation im weiteren Verlauf von AP 4.

Zielerreichung: Die Datenquellen sowie ihre Interaktionen wurden identifiziert und beschrieben, wodurch die Ziele des AP erreicht wurden.

### Arbeitspaket 4.3: Datenaufbereitung

Im Projektverlauf wurden alle Sensoren in die verwendete Beckhoff-SPS eingebunden, was eine zeitlich synchronisierte Erfassung aller relevanten Prozessdaten ermöglichte. Die Kommunikation der Subsysteme innerhalb der LMD-Anlage wurde weitestgehend über Analogsignale sowie das Bussystem EtherCAT realisiert, was geringe Signallaufzeiten und eine hohe Kompatibilität gewährleistete. Es wurde eine Datenaufzeichnungsroutine implementiert, welche nach Prozessende eine XML-Datei mit allen relevanten Signalen ausgab. Über eine in der Software TwinCAT umgesetzte grafische Benutzeroberfläche (englisch: graphical user interface, GUI) konnten die aufzuzeichnenden Daten ausgewählt und weitere Einstellungen vorgenommen werden. Diese Schritte waren essenziell für eine effiziente weiterführende Datenauswertung und -interpretation sowie für die projektweite Datensicherung und -verwaltung.

Die erfassten Sensordaten erforderten teilweise eine zusätzliche Aufbereitung vor der weiterführenden Nutzung. Von den in Tabelle 2 markierten Sensoren sind hier in erster Linie der Laserlinienscanner sowie der OCT-Sensor relevant. Der Laserlinienscanner lieferte eine Punktwolke der aktuellen Bauteiloberfläche nach dem Auftrag einer Schicht, die mittels der auf dem IPC installierten Software MATLAB weiterverarbeitet wurde. Diese Punktwolke wurde auf den relevanten Bereich zugeschnitten und mit einem Gauß-Filter mit einer Fensterlänge von 100 Messpunkten geglättet. Die maximale Messfrequenz des OCT-Sensors betrug 70 kHz, was für das drahtbasierte LMD mehr als ausreichend ist. Die Grund-Messfrequenz wurde daher untersuchungsspezifisch herabgesetzt. Weiterhin wurde jeweils der Mittelwert

aus aufeinanderfolgenden Datenfenstern gebildet, was eine Reduzierung der zu verarbeitenden Datenmenge sowie eine Signalglättung bewirkte.

Ein weiterer Teil dieses AP war die Echtzeit-Visualisierung der Sensorsignale. Diese erfolgte über die Software MATLAB, die mittels TwinCAT-MATLAB-Interface echtzeitfähig mit der SPS verbunden war. In Verbindung mit hochaufgelösten Aufnahmen der Prozesszone wurde so eine vollständige Echtzeit-Überwachung des Auftragsprozesses durch den Anlagenbediener ermöglicht.

Zielerreichung: Aus den Rohdaten der Sensoren (Laserlinienscanner und OCT-Sensor) für die Regelung und die Qualitätssicherung wurden nutzbare Datensätze generiert. Die relevanten Randbedingungen wurden aus den Anforderungen an den Aufbauprozess und die Prozessregelung identifiziert, wodurch die Ziele des AP erreicht wurden. Zusätzlich wurde noch eine Echtzeit-Visualisierung implementiert.

#### **Arbeitspaket 4.4: Dateninterpretation**

In diesem AP erfolgte die Interpretation der erfassten und teilweise vorverarbeiteten Sensordaten. Ein wesentliches Ziel war es, geeignete Eingangssignale für die in AP 6 implementierten Regelungen zu erzeugen, wofür die entworfenen Datenverarbeitungsalgorithmen echtzeitfähig sein mussten.

Der verwendete Laserlinienscanner lieferte wie oben beschrieben eine Punktwolke der Bauteiloberfläche nach dem Auftrag einer Schicht. Aus dieser Punktwolke waren nutzbare Schichthöhendaten zu extrahieren, wofür eine automatisierte Datenverarbeitungs pipeline in MATLAB implementiert wurde. Für dünnwandige Bauteile wurde die Mittellinie der obersten Schweißraupe anhand der globalen Maxima der Höhenprofile entlang des Bauteils bestimmt. Diese Mittellinie wurde in 1 mm lange Segmente unterteilt, innerhalb derer die Höhenwerte gemittelt wurden, was die Robustheit der Messung erhöhte. Dies führte auf ein diskretes Höhenprofil, welches für die Schichthöhenregelung in AP 6 genutzt werden konnte.

Die Abstandsdaten des OCT-Sensors konnten – eine geeignete Kalibrierung vorausgesetzt – ohne aufwändige Vorverarbeitung für erste Machbarkeitsstudien zur OCT-basierten Schichthöhenregelung an einfachen Geometrien verwendet werden. Für eine zuverlässige Echtzeit-Höhenmessung bei willkürlichen Bauteilgeometrien wurde der OCT-Messspot kontinuierlich im ringförmigen Strahlprofil des Bearbeitungslasers um das Schmelzbad rotiert. Mit dem resultierenden Signal war es erstmals möglich, die Topographie im unmittelbaren Vor- und Nachlauf der Prozesszone in Echtzeit zu rekonstruieren, was erneut über eine Datenverarbeitungsroutine in MATLAB erfolgte. Zudem konnten algorithmenbasiert skalare Features wie die Peak-Höhe im Vor- und im Nachlauf sowie die Breite der Schweißraupe aus den Daten gewonnen werden. Diese Features konnten als Eingangsgröße für die Prozessregelung genutzt werden.

Zudem konnte mittels Sensordatenfusion ein umfassendes Bild der veränderlichen Prozessbedingungen während des Bauvorgangs erhalten werden. Hierfür wurden die mittels des OCT-Sensors erfassten Echtzeit-Schichthöhendaten mit weiteren Sensordaten überlagert. Abbildung 8 zeigt dies beispielhaft anhand eines dünnwandigen Dreieckprofils, wobei die aufgezeichnete Bahntrajektorie des Roboters sowie die mittels Sensoren erfassten Daten der Schichthöhe und der Schmelzbadtemperatur überlagert dargestellt sind. Anhand des gezeig-

ten Beispiels wird deutlich, dass es ohne eine geeignete Prozessregelung zu Materialanhäufungen sowie zu einem Wärmestau im Bereich von Ecken kommen kann und dass die Bauteiltemperatur mit zunehmender Schichthöhe stetig ansteigt. Neben der vollständigen Rekonstruktion der Prozesszustände stellt die umgesetzte Sensordatenfusion ein mächtiges Werkzeug zur Visualisierung dar und trägt erheblich zu einer Erhöhung des Prozessverständnisses bei. Die Daten bieten zudem einen signifikanten Mehrwert für nachgelagerte Prozessschritte wie eine Wärmebehandlung oder die spanende Nachbearbeitung.

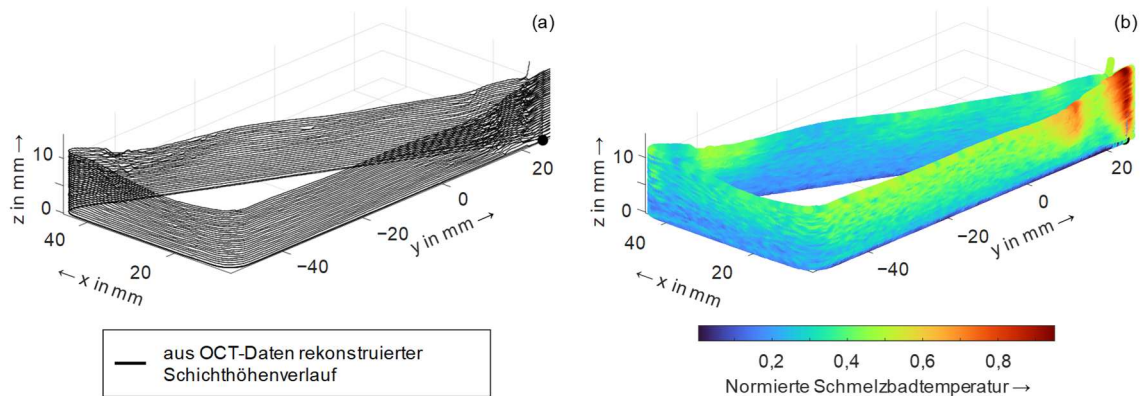


Abbildung 8: Vollständige Rekonstruktion der Prozesszustände für ein unregelmäßig aufgebautes Bauteil basierend auf Inline-Sensordaten

Ein weiteres wichtiges Projektergebnis, das sich dem Bereich der Dateninterpretation zuordnen lässt, ist ein Bildauswertungsalgorithmus, mit dem der  $\delta$ -Ferrit-Anteil in 316L-Bauteilen anhand von Mikroskopaufnahmen bestimmt werden kann. Hierfür wurden zunächst anhand eines Schwellwerts Binärbilder erzeugt, was aufgrund des erheblichen Unterschieds in der Helligkeit der Phasen (Austenit und  $\delta$ -Ferrit) nach der metallographischen Präparation möglich war. Der  $\delta$ -Ferrit-Gehalt konnte anschließend anhand der im Binärbild vorhandenen schwarzen Pixel quantifiziert werden.

Über den Projektverlauf hinweg wurde zudem die Eignung verschiedener Machine-Learning-Ansätze für die Interpretation der erfassten Sensordaten und der Qualitätsmerkmale evaluiert. Der Fokus der Betrachtungen lag dabei auf der echtzeitfähigen Identifikation von Anomalien während des Auftragsprozesses. Basierend auf einer Literaturrecherche zum Stand der Technik wurden potenzielle Methoden identifiziert. Tabelle 3 bietet einen Überblick über diese Methoden mit ihren Vor- und Nachteilen.

Tabelle 3: Auswahl potenzieller Machine-Learning-Ansätze zur Identifikation von Anomalien bei DED-Prozessen

Methoden mit Beschreibung	Vorteile	Nachteile
Support Vector Machine (trennt Datenpunkte im Featurespace durch Hyperebene)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- einfach zu implementieren</li> <li>- schnelles Training</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Verlässlichkeit der Ergebnisse</li> <li>- keine direkte Berücksichtigung der Zeit</li> </ul>
Multivariate Long Short-Term Memory (LSTM)-Autoencoder (zählt zu den Recurrent Neural Networks (RNN); auch	<ul style="list-style-type: none"> <li>- kein Labeling der Daten erforderlich</li> <li>- gute Anomalie-Erkennung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- zeitintensives Training</li> <li>- aufwändige Interpretation</li> <li>- große Datenmenge erforderlich</li> </ul>

Zeit berücksichtigt; Videos können analysiert werden.)		
State Space Models (Beschreibung dynamischer Systeme durch zeitlich veränderliche Zustandsvariablen; vielseitig einsetzbar)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- hochwertige Ergebnisse</li> <li>- unterschiedliche Berechnungsmodi (sequenziell und parallel) für schnelles Training (im Vergleich zu ähnlichen Architekturen)</li> <li>- Abbildung langer zeitlicher Zusammenhänge</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- rechen- und zeitintensives Training</li> <li>- komplexe Mathematik</li> </ul>
DBSCAN, K-Means (Clustering-Algorithmen zur Analyse des Feature-Space; Klassifikation von Datenpunkten in eine vorgegebene Anzahl an Klassen)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- schnelles Training</li> <li>- kein Labeling erforderlich</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Features (Mittelwert, Median, Standardabweichung etc.) müssen zunächst aus vorhandenen Messdaten berechnet werden.</li> </ul>

Für die bei den untersuchten Prozessen vorhandenen Daten in Form von multivariaten Zeitreihen stellte sich heraus, dass klassische Regressionsanalysen zielführend waren, insbesondere für die Modellbildung im Hinblick auf die Regelungen. Die typischen Prozessdefekte (Tropfen- und Stummelbildung) waren auch ohne aufwändig trainierte Algorithmen direkt zu identifizieren. Komplexe Machine-Learning-Methoden erfordern zudem häufig ein zeitaufwendiges Labeling durch den Anwender.

Zielerreichung: Die Ziele (Sensordatenfusion, analytische Dateninterpretation und Identifikation von Machine-Learning-Methoden) wurden vollständig erreicht. Der zusätzlich entwickelte Bildauswertalgorithmus sowie die Rekonstruktion der Schichthöhenverläufe stellen zusätzliche Arbeiten dar.

## Arbeitspaket 5: Simulationsgestützte Prozessplanung

### Arbeitspaket 5.1: Simulation

In diesem AP wurden Simulationsansätze für DED-Prozesse entwickelt und erprobt. Das übergeordnete Ziel bestand darin, einerseits Modelle mit hoher Genauigkeit hinsichtlich der thermomechanischen Ergebnisse zu erstellen und andererseits effiziente Modelle zu entwickeln, die eine schnelle Simulation erlauben.

Zunächst wurde eine digitale Datenkette definiert, die es ermöglicht, das mit DED gefertigte Bauteil direkt in eine Prozesssimulation zu überführen (Abbildung 9). Ein zentrales Modul dieser Datenkette ist die CAM-FEM-Kopplung (CAM: Computer-Aided Manufacturing, dt.: rechnergestützte Fertigung), die den G-Code aus dem CAM-System direkt in das für das FEM-Programm lesbare INP-Format umwandeln kann. Dadurch lässt sich die Bahn der DED-Werkzeuge präzise in der Simulation abbilden.

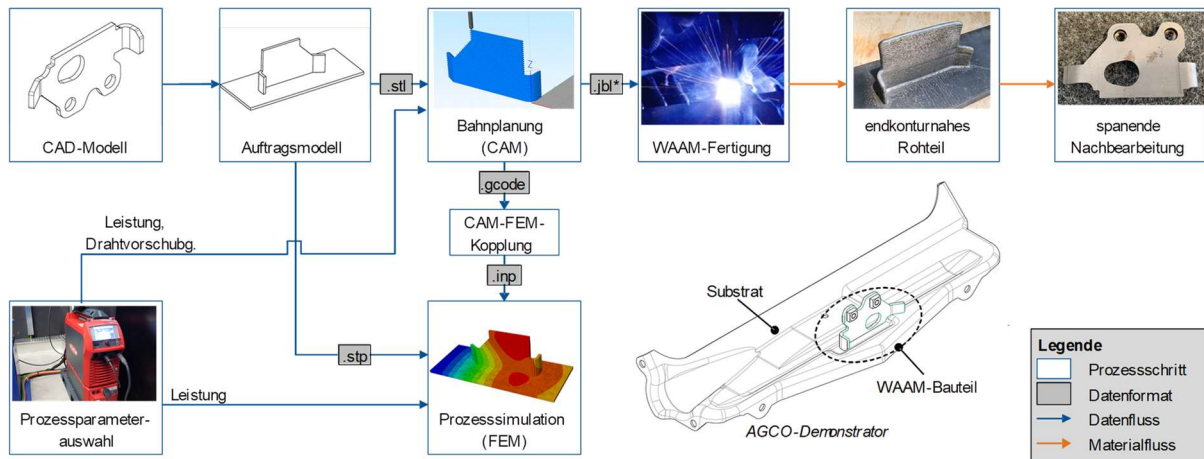


Abbildung 9: Digitale Datenkette für den DED-Prozess

Um den DED-Prozess simulieren zu können, müssen sowohl der Wärmeeintrag durch das DED-Werkzeug als auch der Materialauftrag durch das geschmolzene Metall numerisch abgebildet werden. Dafür wurden in der FEM-Simulationsumgebung (siehe Abbildung 10) zwei Konzepte implementiert: die bewegte Wärmequelle und die Elementaktivierung. Die bewegte Wärmequelle stellt ein bewegtes Volumen dar, das thermische Energie in das Bauteil einbringt. Geometrie und Wirkungsgrad dieses Volumens wurden anhand experimenteller Untersuchungen kalibriert und validiert. Die Elementaktivierung bezeichnet ein Verfahren, bei dem Elemente zu Beginn der Simulation inaktiv sind und somit nicht zu den Bauteileigenschaften beitragen. Erst mit fortschreitendem Bauteilaufbau werden sie schrittweise aktiviert.

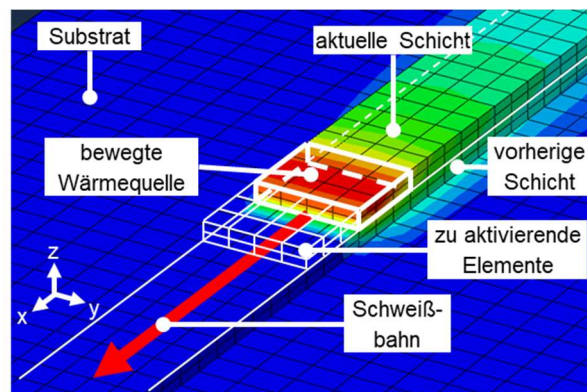


Abbildung 10: FEM-Simulationsumgebung für die Modellierung der DED-Prozesse

Die experimentelle Kalibrierung und Validierung der thermomechanischen FEM-Simulation erfolgte anhand zweier Geometrien: einer Wandgeometrie und einer A-förmigen Geometrie. Dabei wurden sowohl die Temperaturen als auch die Verformung der Substratplatte an ausgewählten Positionen gemessen und mit den Simulationsergebnissen verglichen. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 11 dargestellt.

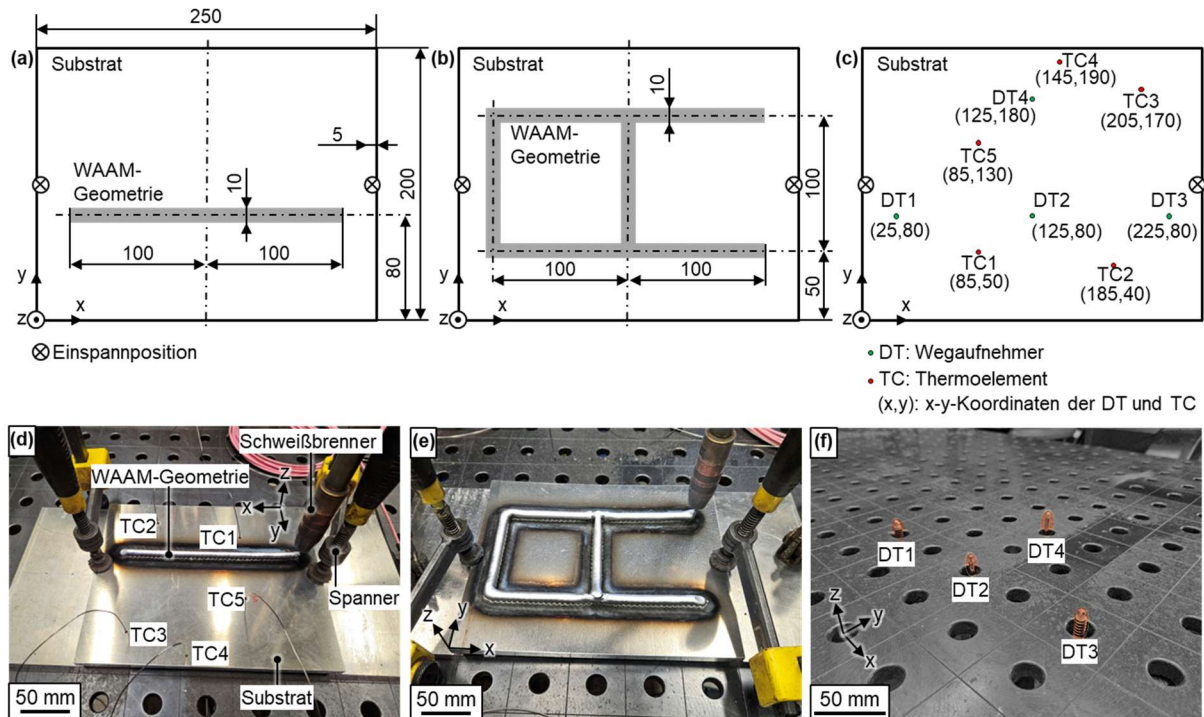


Abbildung 11: Versuchsaufbau zur Kalibrierung und Validierung des FEM-Simulationsmodells: (a) Skizze der Wandgeometrie, (b) Skizze der A-förmigen Geometrie, (c) Positionierung der Thermoelemente (TC) und Wegaufnehmer (DT), (d) Versuchsaufbau nach der WAAM-Fertigung einer Wandgeometrie, (e) Versuchsaufbau nach der WAAM-Fertigung einer A-förmigen Geometrie und (f) Installation der Wegaufnehmer auf dem Schweißstisch (ohne Substratplatte); alle Maße und Koordinaten sind in mm angegeben.

Die Temperaturverläufe aus der Simulation und den Messungen sind in Abbildung 12 gezeigt. Beide zeigen einen periodischen Temperaturanstieg bis zum Ende des WAAM-Prozesses nach etwa 300 Sekunden, gefolgt von einer Abkühlungsphase. Dieses Temperaturverhalten ist typisch für DED-Prozesse, da das DED-Werkzeug (in diesem Fall der Schweißbrenner) in jeder Schicht bestimmte Bereiche des Bauteils erneut aufheizt. Der Vergleich der Simulationsergebnisse mit den Messwerten zeigte eine hohe Übereinstimmung, was bestätigt, dass die thermische Simulation in der Lage ist, den WAAM-Prozess abzubilden.

Als nächstes wurden die Verzugsergebnisse aus der mechanischen Simulation mit den Messungen der Wegaufnehmer verglichen. Alle Wegaufnehmer registrierten eine periodisch zunehmende Verformung in negativer z-Richtung, wobei DT2 (siehe Abbildung 13b) die größte Verformung aufwies. Diese Beobachtung stimmte mit der visuellen Inspektion der Proben überein, die im mittleren Abschnitt die stärkste Verformung zeigten. Die Simulationsergebnisse wiesen auch hier Übereinstimmungen mit den experimentellen Daten auf, da sie sowohl die allgemeinen Trends als auch die temporären Verzugsspitzen im Diagramm aufweisen. Geringe Standardabweichungen, insbesondere bei DT2 und DT3, deuten auf eine hohe Reproduzierbarkeit der experimentellen Methoden hin.

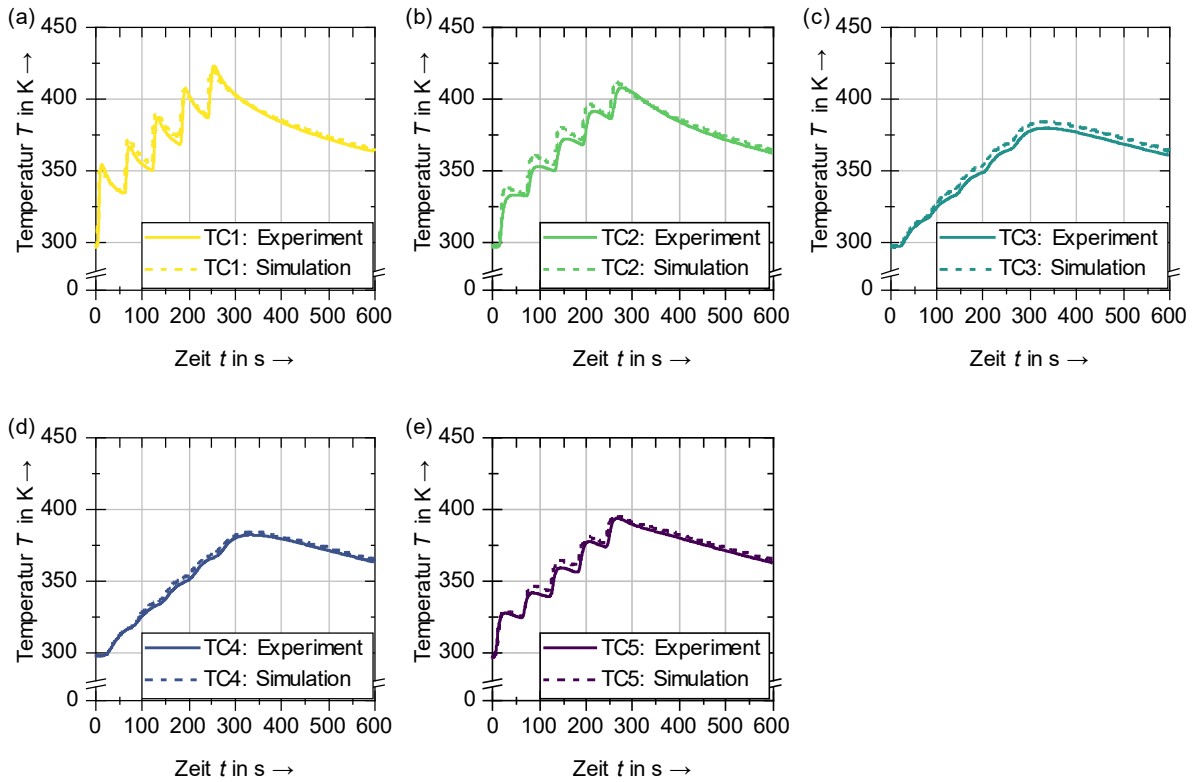


Abbildung 12: Vergleich der thermischen Messungen mit den Simulationsergebnissen für die Positionen (a) TC1, (b) TC2, (c) TC3, (d) TC4 und (e) TC5

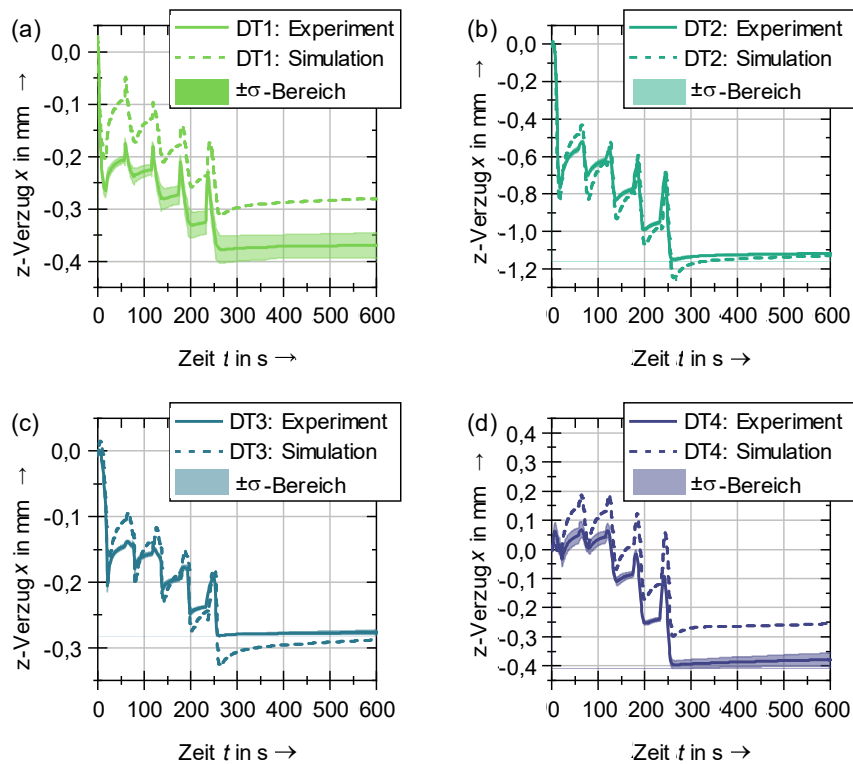


Abbildung 13: Vergleich der Verzugsmessungen mit den Simulationsergebnissen für die Positionen (a) DT1, (b) DT2, (c) DT3 und (d) DT4; Die Standardabweichungen wurden anhand der Messdaten aus drei Versuchsdurchführungen bestimmt.

In DED-Simulationen kann die Berechnung mittels FEM mehrere Stunden bis mehrere Tage in Anspruch nehmen. Obwohl die thermischen und mechanischen Ergebnisse, wie oben dargestellt, eine hohe Genauigkeit aufweisen, ist der Zeitaufwand für die Durchführung der Simulationen sehr hoch. Daher sind FEM-Simulationen für Optimierungsaufgaben in der Prozess- und Bahnplanung ungeeignet.

Um diesem Problem zu begegnen, wurde im Rahmen von **AdDEDValue** eine Modellvereinfachung entwickelt und umgesetzt. Dabei kam ein komplexitätsreduziertes Modell, die Simplified DED Simulation (SDS), zum Einsatz. Das Ziel der SDS bestand darin, eine effiziente Suche nach der optimalen Auftragssequenz auf Basis einer definierten thermischen Zielfunktion zu ermöglichen, anstatt exakte Temperaturberechnungen durchzuführen, wie sie bereits mit den vorangegangenen thermomechanischen FEM-Simulationen realisiert werden konnten.

Beim SDS wird eine dünnwandige Geometrie in einen mathematischen Graphen überführt, der aus Knoten  $v_i$  und Kanten  $e_j$  besteht. Die entsprechenden Graphendarstellungen für die in Abbildung 14 gezeigten Geometrien sind in Abbildung 15 dargestellt. Dabei repräsentiert jede Kante eine Schweißoperation, während jeder Knoten einen möglichen Start- oder Endpunkt einer Schweißoperation darstellt. Eine Auftragssequenz definiert die Reihenfolge und Richtung, in der die Schweißoperationen ausgeführt werden, um eine Schicht vollständig aufzubauen.

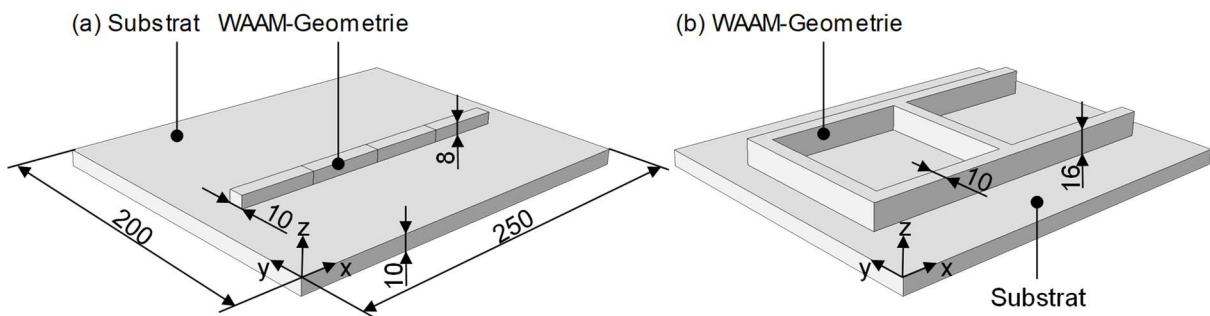


Abbildung 14: Verwendete Geometrien: (a) vierteilige Wandgeometrie und (b) A-förmige Geometrie; alle Abmessungen sind in mm angegeben.

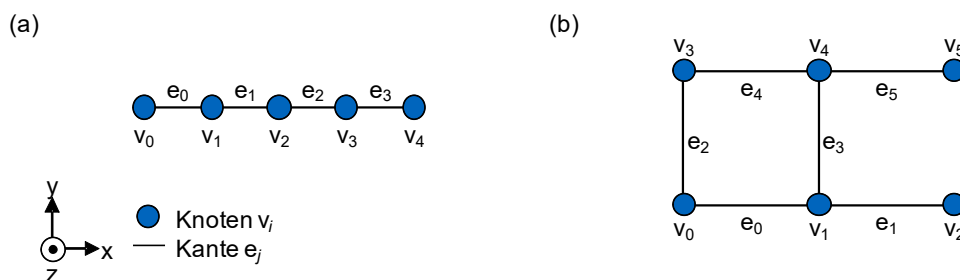


Abbildung 15: Graphendarstellung der verwendeten Geometrien: (a) die vierteilige Wandgeometrie und (b) die A-förmige Geometrie

Zu Beginn einer SDS wird jedem Knoten eine Anfangstemperatur zugewiesen. Der simulierte Schweißbrenner (beim WAAM) bewegt sich dann entlang der Kanten in einer vordefinierten Abfolge, die aus Schweiß- und Verfahroperationen besteht. Bei den Schweißoperationen ist der Schweißbrenner aktiv, während er bei den Verfahroperationen inaktiv ist. Verfahroperationen sind notwendig, wenn der nächste Schweißvorgang an einem anderen Knoten beginnt.

Wenn während des Schweißvorgangs ein Knoten erreicht wird, wird eine bestimmte Energiemenge auf den Knoten aufgebracht, wodurch sich seine Temperatur erhöht. Das anschließende Abkühlverhalten des Knotens wird dann mit Hilfe der folgenden halbanalytischen Abkühlfunktion bestimmt:

$$T_{\text{SDS},d}(t) = T_{0,d} + \frac{c_{1,d}}{t^{c_{3,d}}} \exp(-c_{2,d} \cdot t) , \quad (1)$$

wobei  $t$  die Zeit und  $T_{0,d}$ ,  $c_{1,d}$ ,  $c_{2,d}$  und  $c_{3,d}$  Kalibrierungskonstanten sind, die das Abkühlverhalten in Abhängigkeit des Grads des Knotens  $d$  definieren. Der Grad eines Knotens ist die Anzahl der verbundenen Kanten eines Knotens. Für einen Satz von DED-Parametern können die Kalibrierungskonstanten für einen Knoten  $d$ -ten Grades mit Hilfe einer zuvor validierten FEM-Simulation bestimmt werden. In Tabelle 4 ist ein Satz Kalibrierungskonstanten für ein-, zwei- und dreigradige Knoten angegeben.

Tabelle 4: Kalibrierungskonstanten für ein-, zwei- und dreigradige Knoten

	Grad des Knotens		
	$d = 1$	$d = 2$	$d = 3$
$T_{0,d}$ in K	463,09	452,67	498,61
$c_{1,d}$ in $\text{K} \cdot \text{s}^{c_{3,d}}$	236,01	215,21	164,34
$c_{2,d}$ in 1/s	0,0388	0,0355	0,0876
$c_{3,d}$ in –	0,1922	0,1672	0,1787

**Zielerreichung:** Die Ziele des AP laut Projektantrag waren eine standardisierte digitale Datenkette, der Aufbau einer Materialdatenbank, die numerische Modellbildung, die Modellkalibrierung und -validierung sowie die Reduzierung der Modellordnung und die Entwicklung hybrider Modelle. Im Laufe der Bearbeitung des AP wurden diese Ziele erreicht. Ein Fokus wurde auf das WAAM-Verfahren gelegt.

### Arbeitspaket 5.2: Prozess- und Bahnplanung

Mithilfe der SDS konnte der thermische Verlauf an den Knoten für verschiedene Auftragssequenzen effizient berechnet werden. Ziel der Untersuchung war eine identifizierte Sequenz, die hinsichtlich definierter thermischer und mechanischer Kriterien am vorteilhaftesten ist. Hierzu war zunächst die Festlegung eines Optimierungsziels erforderlich. Im Rahmen von **AdDEDValue** wurden für die Prozess- und Bahnplanung zwei Optimierungsziele betrachtet: die Minimierung der Zwischenlagentemperatur und die Minimierung des Substratverzugs.

Die Zwischenlagentemperatur im DED-Kontext bezeichnet die Temperatur der Werkstoffoberfläche unmittelbar vor dem Auftragen einer neuen Schicht. Sie stellt eine relevante Kenngröße im Rahmen der Qualitätssicherung von DED-Bauteilen dar, da sie die Oberflächengeometrie und die Mikrostruktur des Bauteils wesentlich beeinflussen kann. Der Substratverzug hingegen resultiert aus der Entstehung von Eigenspannungen während des additiven Fertigungsprozesses. Diese geometrischen Abweichungen sind in der Regel unerwünscht und daher zu minimieren.

Zur Untersuchung der Zwischenlagentemperatur wurde ein beispielhaftes Bauteil (siehe Abbildung 16) definiert. Für dieses wurden alle möglichen Auftragssequenzen mithilfe der SDS **AdDEDValue**

durchsimuliert. Die resultierenden thermischen Daten wurden anschließend hinsichtlich der minimalen Zwischenlagentemperatur ausgewertet.

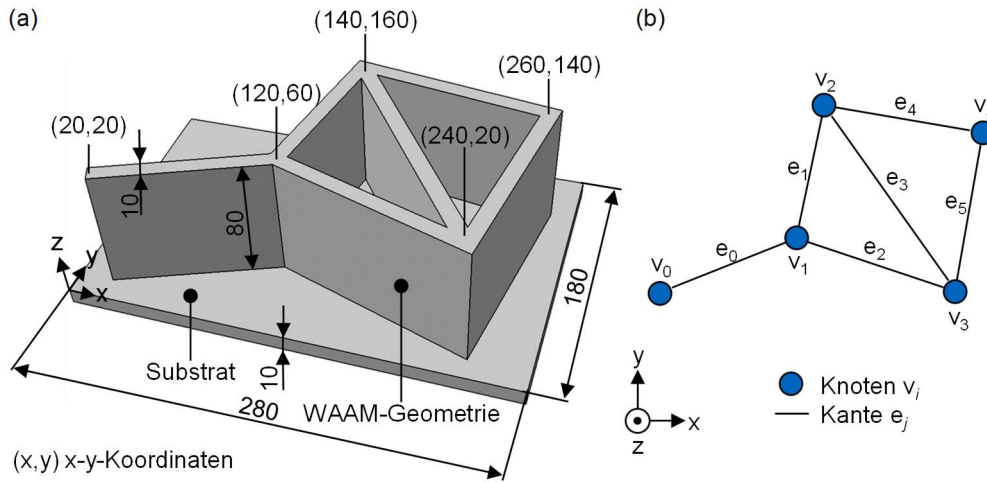


Abbildung 16: Beispielhaftes Bauteil (a) als dreidimensionales CAD-Teil und (b) in Graphendarstellung; alle Maße und Koordinaten sind in mm angegeben.

Als Ergebnis konnten zwei beste und zwei schlechteste Auftragssequenzen identifiziert werden, die in Abbildung 17 dargestellt sind. Auffällig war, dass sowohl die besten als auch die schlechtesten Sequenzen jeweils palindromisch aufgebaut waren, das heißt, ihre Reihenfolge der Schweißoperationen waren gespiegelt.

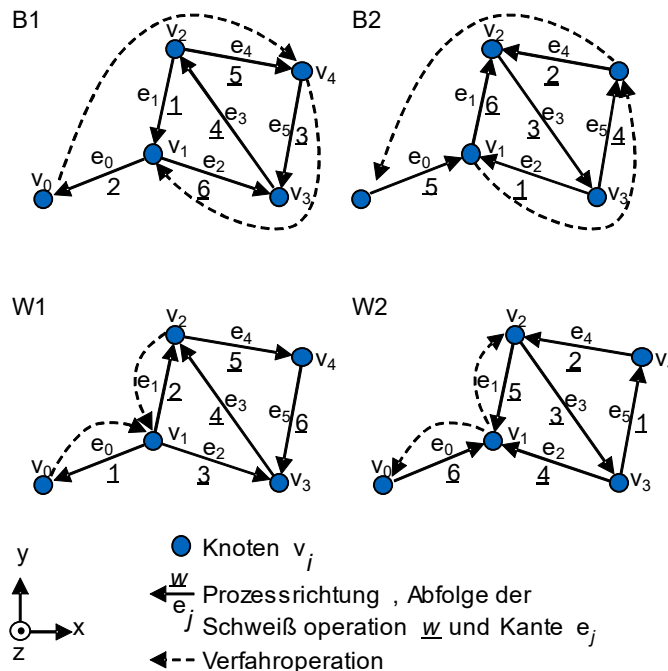


Abbildung 17: Graphendarstellung der zwei besten (B1 und B2) und schlechtesten (W1 und W2) Auftragssequenzen

Die besten und schlechtesten Auftragssequenzen wurden anschließend mithilfe einer FEM-Simulation analysiert. Die entsprechenden Ergebnisse sind in Abbildung 18 dargestellt. Dabei zeigte sich, dass die besten Sequenzen geringere Zwischenlagentemperaturen aufwiesen, insbesondere in den Bereichen um die Knoten  $v_1$  und  $v_3$ .

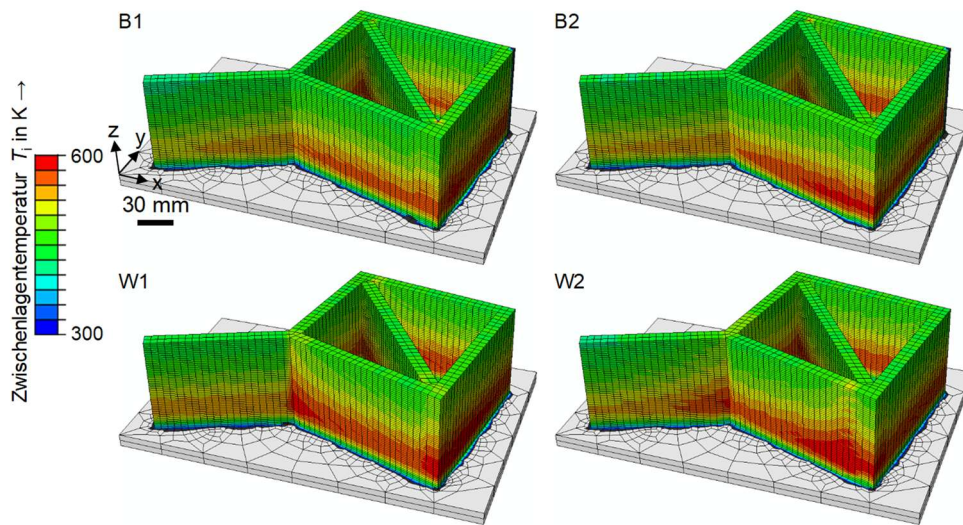


Abbildung 18: Visualisierung der Zwischenlagentemperatur der untersuchten besten (B1 und B2) und schlechtesten (W1 und W2) Auftragssequenzen

Für die Minimierung des Substratverzugs musste zunächst der Zusammenhang zwischen dem SDS-Simulationsergebnis und dem auftretenden Verzug ermittelt werden. Hierbei wurde eine Vielzahl von Auftragssequenzen mithilfe der FEM-Simulation ausgewertet. Der simulierte Verzug wurde anschließend in einen statistischen Zusammenhang mit den korrespondierenden SDS-Ergebnissen gebracht. Dabei zeigte sich, dass insbesondere das Bewertungsverfahren, welches die Auftragssequenzen nach der durchschnittlichen thermischen Exzentrizität sortierte, ein statistisch signifikantes Verhältnis zum Verzug aufwies.

Anschließend wurden für die beiden Geometrien aus Abbildung 14 jeweils die beste und die schlechteste Auftragssequenz identifiziert und im WAAM-Verfahren gefertigt. Zur Erhöhung der Aussagekraft der Untersuchung wurde darüber hinaus eine dritte, intuitiv gewählte Auftragssequenz berücksichtigt und ebenfalls gefertigt.

Nach der Probenherstellung erfolgte eine Vermessung der Substratplatten mithilfe eines 3D-Scanners. Die Messergebnisse sind in Abbildung 19 und 20 dargestellt. Für beide Geometrien zeigten alle drei Proben ein ähnliches Verzugs muster, das durch kontinuierlich zunehmende Verzugswerte vom äußeren Rand zur Plattenmitte gekennzeichnet war. Verglich man die Proben untereinander, ließ sich ein klarer Trend erkennen. Sowohl die Ausdehnung als auch die Höhe der maximalen Verformungsbereiche nahmen von der besten über die intuitive bis hin zur schlechtesten Auftragssequenz progressiv zu. Diese Ergebnisse deuteten darauf hin, dass die hier beschriebenen Maßnahmen zur automatisierten Prozess- und Bahnplanung mit dem Ziel der Verzugsminimierung erfolgreich waren.

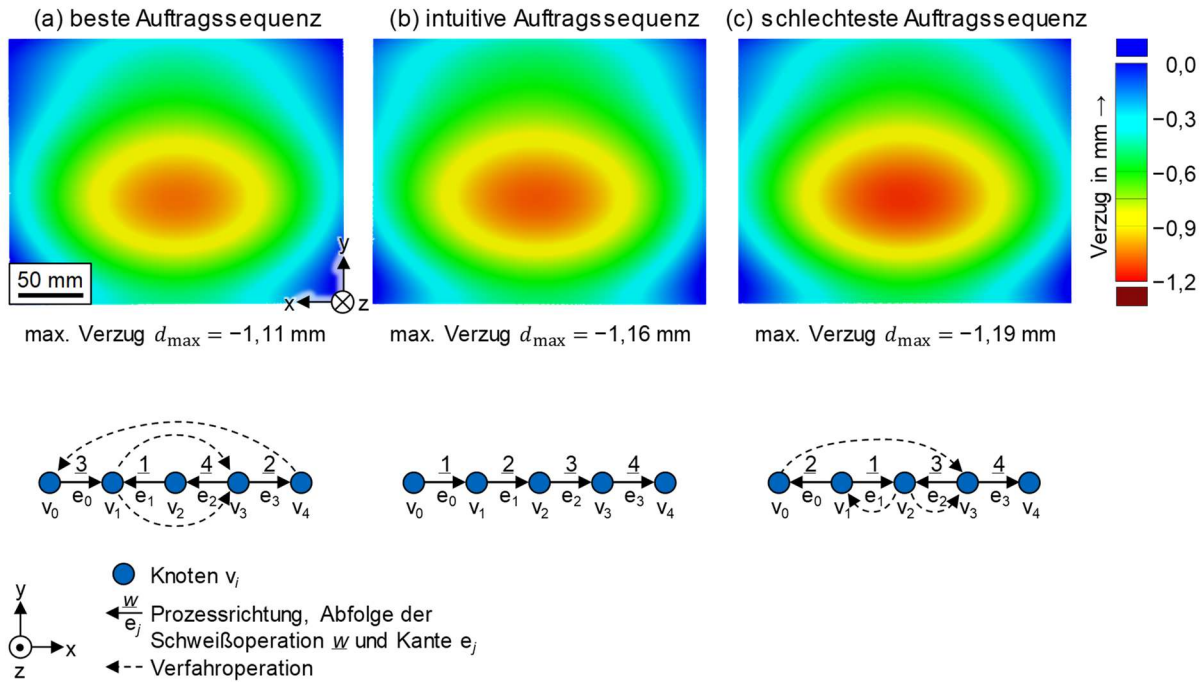


Abbildung 19: Auftragssequenzen und 3D-Scanergebnisse der vierteiligen Wandgeometrie (Abbildung 14a), hergestellt mit (a) der besten, (b) der intuitiven und (c) der schlechtesten Auftragssequenz

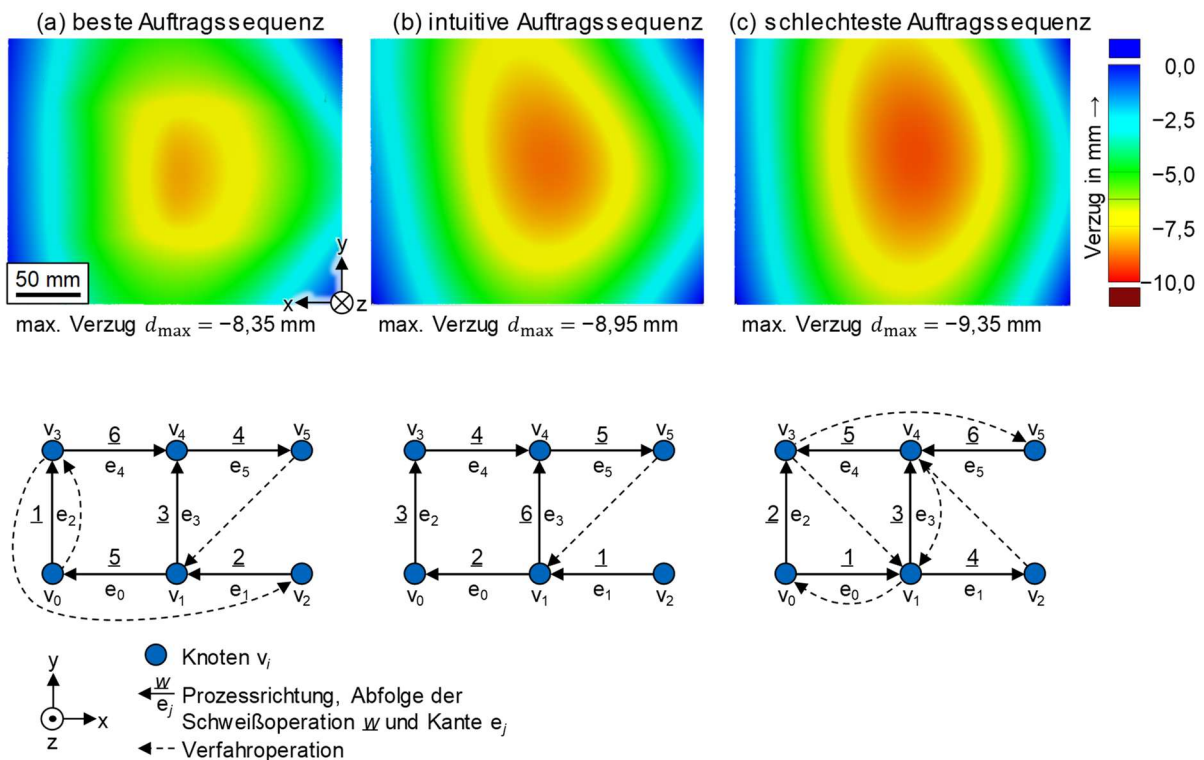


Abbildung 20: Auftragssequenzen und 3D-Scanergebnisse der A-förmige Geometrie (Abbildung 14b), hergestellt mit (a) der besten, (b) der intuitiven und (c) der schlechtesten Auftragssequenz

**Zielerreichung:** Laut Projektantrag waren die Ziele dieses AP die automatisierte Geometriidentifikation, die geometrieabhängige Planung der Bahnführungsstrategie sowie die simulationsbasierte Parameteroptimierung. Alle drei Ziele wurden vollständig erreicht.

## Arbeitspaket 6: Automatisierung

### Arbeitspaket 6.1: Prozessregelung

In diesem AP wurden verschiedene Regelungsansätze erarbeitet, wobei das übergeordnete Ziel die Gewährleistung eines stabilen Prozesses über eine hohe Anzahl an Schichten hinweg war. Hierbei standen die Schmelzbadtemperatur und die Schichthöhe als Regelgrößen im Fokus.

Zunächst waren valide Systemmodelle zu ermitteln, welche die dynamischen Zusammenhänge zwischen den Eingangsgrößen und den Ausgangsgrößen des Systems abbildeten. Die Laserleistung wurde dabei als Stellgröße für die Schmelzbadtemperatur eingesetzt, während die Drahtvorschubgeschwindigkeit als Stellgröße für die Schichthöhe diente. Um den Zusammenhang zwischen der Laserleistung und der Schmelzbadtemperatur zu ermitteln, wurde eine experimentelle Systemidentifikation durchgeführt. Hierfür wurden innerhalb des stabilen Prozessfensters Sprungantwortversuche durchgeführt, wobei die Laserleistung jeweils um 500 W erhöht wurde. Aus den aufgezeichneten Daten wurde ein allgemeingültiges Systemmodell ermittelt. Zusätzlich wurde ein Wärmeleitungsmodell aufgebaut und experimentell kalibriert, mit dem der Wärmehaushalt im Prozess basierend auf einer Wärmestrombilanz schichtweise vorhergesagt werden konnte. Für den Zusammenhang zwischen der Drahtvorschubgeschwindigkeit und der gemessenen Schichthöhe war in erster Linie die statische Verstärkung relevant, während das transiente Verhalten aufgrund der Schmelzbadlänge von mehreren Millimetern, welche zu einem inhärenten Glättungseffekt führte, vernachlässigt werden konnte. Die statische Verstärkung wurde sowohl unter Verwendung des Laserlinienscanners als auch des OCT-Sensors anhand von Sprungantwortversuchen ermittelt und diente als Basis für den Reglerentwurf.

Basierend auf den Systemmodellen erfolgte jeweils der simulative Reglerentwurf. Es wurden durchweg lineare Reglerstrukturen verwendet, da keine wesentlichen Modellunbestimmtheiten oder Nichtlinearitäten vorlagen, die komplexere Reglerstrukturen erforderlich gemacht hätten. Für die Schmelzbadtemperatur wurde ein Proportional-Integral-Regler (PI-Regler) entworfen, dessen Reglerparameter im Hinblick auf eine schnelle Annäherung an den Sollwert bei geringem Überschwingen eingestellt wurden. Neben dieser Echtzeit-Temperaturregelung wurde zudem für den mehrschichtigen Aufbau komplexer Bauteile eine schichtweise arbeitende Zwei-Freiheitsgrade-Regelung entworfen, welche basierend auf der Durchschnittstemperatur der vorangegangenen Schicht die Laserleistung für die folgende Schicht stellte. Für die auf dem Laserlinienscanner basierende Schichthöhenregelung wurde ein neuartiger diskreter Regelungsansatz erarbeitet, bei dem innerhalb einzelner Segmente entlang der Schweißraupen jeweils ein PI-Regler die Drahtvorschubgeschwindigkeit basierend auf den Höhendaten der letzten Schichten stellte. Bei der OCT-basierten Schichthöhenregelung erwies sich ein Proportional-Regler (P-Regler) als zielführend. Um Überschwingen zu verhindern, wurde der Stellgrößeneingriff im Bereich um den Sollwert zusätzlich reduziert. Bei den Schichthöhenregelungen waren zudem Stellgrößenbeschränkungen erforderlich, da nur innerhalb eines bestimmten Bereichs an Drahtvorschubgeschwindigkeiten ein stabiler Prozess möglich war.

Zielerreichung: Die Ziele (Systemidentifikation und Modellbildung sowie Reglerentwurf) wurden vollständig erreicht.

## Arbeitspaket 6.2: Systemintegration

Alle in AP 6.1 entworfenen Regelungen wurden im Projektverlauf in die physische LMD-Anlage des *iwb* integriert, wobei die Berechnung der Stellgrößen vornehmlich zentral auf dem verwendeten Beckhoff-IPC durchgeführt wurde. Die Regelungen wurden umfangreich experimentell validiert und hinsichtlich der erzielbaren Regelgüte evaluiert. Zudem erfolgten teilweise iterative Anpassungen, weshalb AP 6.1 und 6.2 eng miteinander verknüpft waren.

Für die Reglervalidierung wurden definierte Störgrößen in den Prozess eingebracht. Bei der Echtzeit-Temperaturregelung war dies eine plötzliche Änderung der Substratdicke, wodurch ein Wärmestau provoziert wurde. Die Regelung war in der Lage, die Schmelzbadtemperatur auf einem konstanten Niveau zu halten, wofür die Laserleistung deutlich verringert werden musste. Für die schichtweise arbeitende Temperaturregelung wurde beim Aufbau dünnwandiger Zylinder gezeigt, dass verschiedene Soll-Temperaturverläufe zuverlässig nachgeführt werden konnten. Die beiden Schichthöhenregelungen wurden jeweils anhand einer eingefrästen Nut in der Substratplatte mit einer Tiefe von 1 mm validiert, was eine signifikante Störung darstellte. Beide Regelungen zeigten eine ähnliche Performance, wobei die Nut innerhalb von ca. zehn Schichten vollständig ausgeglichen wurde. Der wesentliche Unterschied lag hierbei in der Echtzeitfähigkeit der OCT-basierten Regelung, wodurch die Gesamtbauzeit deutlich geringer war.

Basierend auf den beschriebenen Regelungsansätzen wurde abschließend eine Mehrgrößenregelung für willkürliche Geometrien entworfen. Die Schichthöhendaten konnten richtungsunabhängig aus dem Signal des rotierenden OCT-Messspots extrahiert werden. Zusätzlich wurde der über den Bauprozess veränderliche Widerstand als Stabilitätskriterium verwendet. Darüber hinaus wurde eine Leistungsreduktion mit zunehmender Bauhöhe implementiert, was zu sehr guten Ergebnissen und einer hohen Prozessstabilität führte. Außerdem wurden Querkopplungen im System über Vorsteuerungen berücksichtigt. Dabei wurde die Drahtvorschubgeschwindigkeit bei geringeren Robotergeschwindigkeiten (beispielsweise in Ecken) durch die Vorsteuerung reduziert. Die Vorsteuerung der Laserleistung berücksichtigte das aufzuschmelzende Material, womit bei geringeren Drahtvorschub- und Robotergeschwindigkeiten auch die Laserleistung reduziert wurde. In ihrer Gesamtheit ermöglichte diese Regelungsarchitektur einen stabilen Prozess mit definierten Schichthöhen über beliebig viele Schichten hinweg, ohne dass es zu einer Überhitzung kam. Ein Ausschnitt der Echtzeit-Visualisierung der finalen Mehrgrößenregelung ist in Abbildung 21 dargestellt.

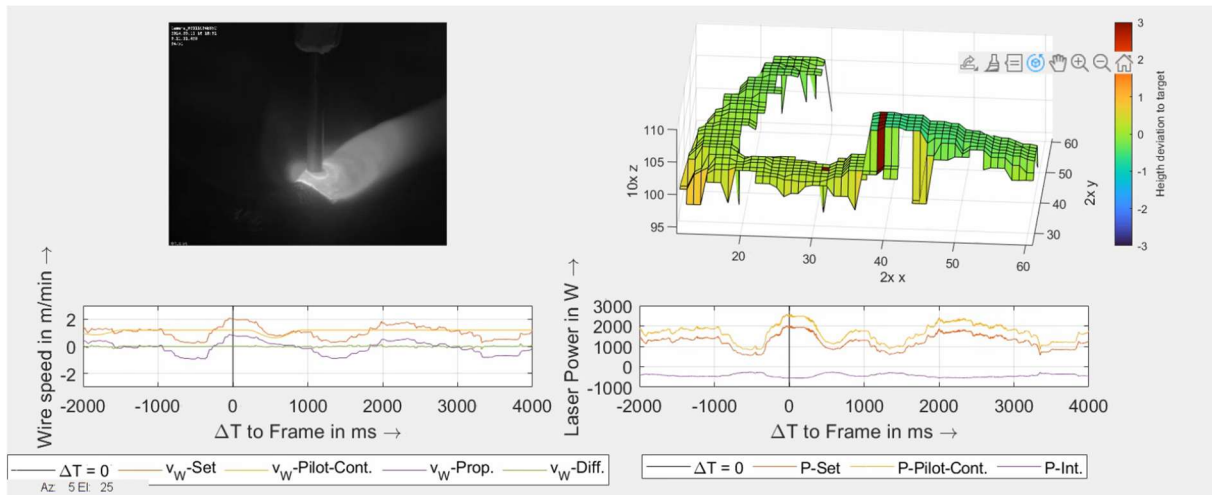


Abbildung 21: Echtzeit-Visualisierung der finalen Mehrgrößenregelung mit dem Prozessvideo, der rekonstruierten Bauteiltopografie und den aus Vorsteuerungs- und Regelungsanteil zusammengesetzten Stellgrößen Drahtvorschubgeschwindigkeit und Laserleistung

**Zielerreichung:** Die Mehrgrößenregelung wurde integriert und validiert. Hierfür wurde ein geeigneter Stellgrößenverlauf ermittelt, wodurch das Ziel des AP erreicht wurde.

## Arbeitspaket 7: Nachbearbeitung und Qualitätssicherung

### Arbeitspaket 7.1: Fräsende Nachbearbeitung

#### Nachbearbeitung mit industriellen Frärobotern

– Diese Textstelle inklusive der Abbildungen 22, 23 und 24 wurde noch nicht veröffentlicht. Sie wurde aufgrund einer noch nicht abgeschlossenen Promotion gestrichen. –

#### Kritische Prozesseinflüsse bei der Nachbearbeitung

– Diese Textstelle inklusive der Abbildungen 25, 26, 27 und 28 wurde noch nicht veröffentlicht. Sie wurde aufgrund einer noch nicht abgeschlossenen Promotion gestrichen. –

#### Plattformübergreifende Einmessstrategie

– Diese Textstelle inklusive der Abbildungen 29 und 30 wurde noch nicht veröffentlicht. Sie wurde aufgrund einer noch nicht abgeschlossenen Promotion gestrichen. –

Aufgrund der Formabweichungen, der geringen Reproduzierbarkeit und fehlender Referenzflächen stellt das Einmessen endkonturnaher DED-Bauteile zur spanenden Nachbearbeitung eine zentrale Herausforderung in der Prozesskette dar. Da ein unzureichend geplanter Einmessprozess zu Bearbeitungsfehlern und zusätzlichen Kosten führen kann, wurde im Rahmen dieses AP eine plattformübergreifende Einmessstrategie entwickelt. Dafür wurde zuerst auf Basis definierter Anforderungen ein Demonstratorbauteil zur Untersuchung möglicher Lösungsansätze konstruiert. Das in Abbildung 19 dargestellte Demonstratorbauteil besteht aus drei verschiedenen Geometrieelementen/Features mit unterschiedlichen Oberflächenwelligkeiten, Bearbeitungszugaben und Wandstärken. Zudem wurden mit dem Demonstratorbauteil die Schwächen optischer und taktiler Messsysteme adressiert.

Das zylindrische Feature wurde so ausgelegt, dass die große Höhe in Kombination mit dem geringen Innendurchmesser zu Verschattung führt und somit ein Teil der Zylinderinnenfläche

mit optischen Messsystemen nicht erfasst werden kann. Das konische Feature besteht zum Teil aus einer komplexen, in zwei Raumrichtungen gewölbten Oberfläche, die mit taktilen Messsystemen nur zeitaufwändig und mit vielen Messpunkten vermessen werden kann. Das T-Stoß-Freiform-Feature besitzt sowohl gerade als auch runde Geometrielemente, für deren Erfassung jeweils eine geeignete Anzahl an Messpunkten festgelegt werden muss. Die in Abbildung 31b dargestellten nachzubearbeitenden Flächen wurden durch die Zugänglichkeitsbegrenzungen für Fräs- und Messwerkzeuge definiert. Abbildung 31a zeigt den Oberflächenvergleich zweier digitalisierter Demonstratorbauteile. Zwischen den beiden Rohteilen traten trotz identischer Fertigungsparameter Formabweichungen von mehreren Millimetern auf, was auf die geringe Prozessrobustheit des WAAM zurückzuführen war.

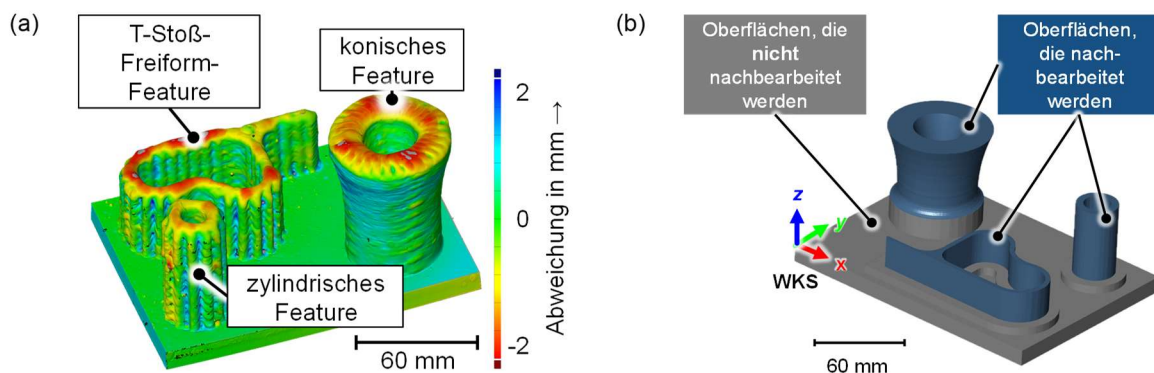


Abbildung 31: Demonstratorbauteil zur Entwicklung einer plattformübergreifenden Einmessstrategie: (a) Vergleich zweier digitalisierter Demonstratorbauteile (Abweichung des ersten Bauteils zum zweiten), (b) abgeleitete Fertigteilgeometrie mit den nachzubearbeitenden Oberflächen

Um zu überprüfen, ob das Demonstratorbauteil für die Untersuchung verschiedener Einmessstrategien geeignet ist, wurde je ein Bauteil mit einer konventionellen und mit der entwickelten plattformübergreifenden Einmessstrategie eingemessen. Bei der konventionellen Einmessstrategie wurde das Werkstückkoordinatensystem (WKS) entsprechend Abbildung 31b auf einer Ecke der Substratplatte definiert, welche beim Einmessen mit einem Messtaster angetastet wurde.

Für die erweiterte Einmessstrategie wurde ein bereits in den Schraubstock eingespanntes Demonstratorbauteil wie in Abbildung 32 dargestellt zusammen mit einem als Referenzobjekt verwendeten Endmaß digitalisiert. Anschließend wurde das WKS auf einer Ecke des Endmaßes definiert und analog zur Grundplattenecke mit einem Messtaster eingemessen. Das konventionell eingemessene Demonstratorbauteil wies Bearbeitungsfehler an allen drei Geometrielementen auf. Bei dem mit der erweiterten Strategie eingemessenen Bauteil konnte nur ein Bearbeitungsfehler auf dem zylindrischen Feature identifiziert werden. Mit der erweiterten Einmessstrategie konnte somit die Anzahl an Bearbeitungsfehlern reduziert werden. In AP 7.2 wurde für die erweiterte Einmessstrategie ein zusätzlicher Qualitätssicherungsschritt entwickelt, mit dem die Wahrscheinlichkeit für Bearbeitungsfehler bestimmt und iterativ weiter reduziert werden kann.

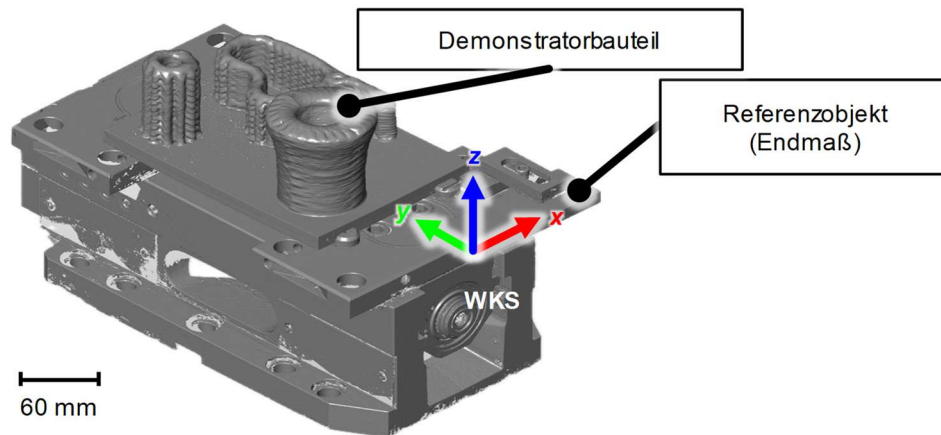


Abbildung 32: Digitalisiertes und im Schraubstock eingespanntes Demonstratorbauteil mit einem Referenzobjekt und dem darauf definierten WKS

**Zielerreichung:** Die ersten beiden sowie das letzte Ziel dieses AP (Modellbildung und digitaler Zwilling, Reglerentwurf und -integration sowie Einbindung in Prozessketten) wurden während der Projektbearbeitung in Abstimmung mit den Projektpartnern neu ausgerichtet. Anstelle des Simulationsmodells wurde ein Augenmerk auf kostengünstige und aufwandsreduzierte Steifigkeitsidentifikationsmethoden (Kofferwaage, Motion-Tracking-System) und deren Übertragbarkeit auf andere Fräsroboter-Modelle gelegt. Diese stellen im Vergleich zu aufwändig aufzubauenden Simulationsmodellen eine schnelle und für industrielle Anwendungen einfach zu implementierende Möglichkeit zur Vorhersage der Abdrängungen dar, was der Grund für die Neuausrichtung war. Alle weiteren Ziele (plattformübergreifende Einspannvorrichtung und konturabhängige Fräsparmeter) wurden wie definiert erreicht. Anstelle der Einbindung in Prozessketten (Integration in AP 7.2) wurde ein Fokus auf eine plattformübergreifende Einmessstrategie gelegt, da sich durch die geringe Reproduzierbarkeit und die fehlenden Referenzflächen der Additiv-Bauteile ein besonderer Handlungsbedarf für die spanende Nachbearbeitung zeigte.

### Arbeitspaket 7.2: Qualitätssicherung

In diesem AP wurden Qualitätsanforderungen und Prüfstrategien für die spanende Nachbearbeitung von WAAM-Bauteilen identifiziert und Handlungsempfehlungen abgeleitet. Die Anforderungen unterteilen sich in die Kategorien Rohteilqualität, Rohteilmodellqualität, Einmessqualität und Fertigteilqualität.

#### Rohteilqualität:

– Diese Textstelle wurde noch nicht veröffentlicht. Sie wurde aufgrund einer noch nicht abgeschlossenen Promotion gestrichen. –

#### Rohteilmodellqualität:

Zur Überprüfung der Rohteilqualität ist ein hochauflösendes digitales Rohteilmodell erforderlich. Dieses kann mit verschiedenen optischen Messgeräten wie beispielsweise Laser- oder

Streifenlichtscannern erstellt werden. Da bei diesen Messverfahren Verschattungen auftreten können, sollte das Rohteilmodell nach dem Messvorgang auf Vollständigkeit überprüft werden.

### Einmessqualität:

Da durch die in AP 7.1 vorgestellte erweiterte Einmessstrategie Bearbeitungsfehler nur reduziert, jedoch nicht vollständig vermieden werden, wurde die Einmessstrategie um die in Abbildung 33 grau markierte Methode zur Sicherstellung einer hohen Einmessqualität erweitert. Die Schritte 1 bis 3 beschreiben die initiale Ausrichtung des Rohteils am Maschinenkoordinatensystem mittels einer Referenzgeometrie entsprechend der erweiterten Einmessstrategie aus AP 7.1. Im anschließenden Qualitätssicherungsschritt soll die Ausrichtung des nachzubearbeitenden WAAM-Bauteils nach dem initialen Einmessen durch Antasten der Rohteiloberfläche überprüft werden. Abhängig von einer zu definierenden Kennzahl, welche die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Bearbeitungsfehlern während des Fräsprozesses angibt, wird entschieden, ob die Ausrichtung des Rohteils angepasst wird oder ob der Einmessprozess abgeschlossen ist. Die Erhöhung der Einmessqualität wird Gegenstand zukünftiger Forschungsarbeiten sein.

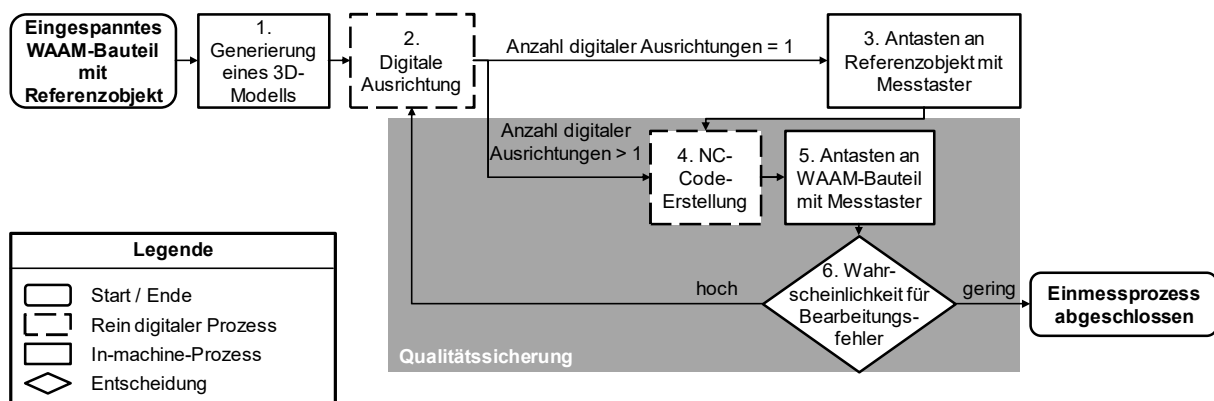


Abbildung 33: Vorgehensweise für die erweiterte Einmessstrategie mit Qualitätssicherung [60]

### Fertigteilqualität:

– Diese Textstelle wurde noch nicht veröffentlicht. Sie wurde aufgrund einer noch nicht abgeschlossenen Promotion gestrichen. –

**Zielerreichung:** Die Ziele laut Projektantrag (Definition von Qualitätsanforderungen und Prüfstrategien) wurden vollständig erreicht. Außerdem wurden eine konzeptionelle Methode und Handlungsempfehlungen zur Planung der Fertigung hinsichtlich der Einhaltung der Qualitätskriterien aufgestellt. Die Methode zur Sicherstellung einer hohen Einmessqualität stellt eine zusätzliche Forschungsleistung dar.

## Arbeitspaket 8: Funktionsdemonstratoren

### Arbeitspaket 8.1: LMD Draht

In diesem AP wurden die Projektergebnisse anhand einer Demonstratoranlage zum drahtbasierten LMD zusammengeführt und demonstriert. Hierfür wurde die bestehende Anlage umfangreich sowohl mit kommerzieller als auch eigens entwickelter Hard- und Software erweitert.

Das LMD-System ermöglicht eine umfassende Prozessüberwachung mittels einer Vielzahl an Sensoren sowie die gleichzeitige Regelung verschiedener Prozessgrößen. Abbildung 34 zeigt den Systemzustand zum Zeitpunkt des Projektendes. Die gewonnenen Prozessdaten können zeitlich synchronisiert für die weiterführende Nutzung zentral abgespeichert werden. Ein vergleichbar leistungsfähiges drahtbasiertes LMD-System ist derzeit anderswo nicht bekannt. Die Funktion des Gesamtsystems wurde unter anderem anhand von Stanzmatrizen demonstriert, welche für König Metall gefertigt wurden. Hierbei kamen verschiedene hochfeste Werkzeugstähle zum Einsatz, welche prozesssicher aufgetragen werden konnten.

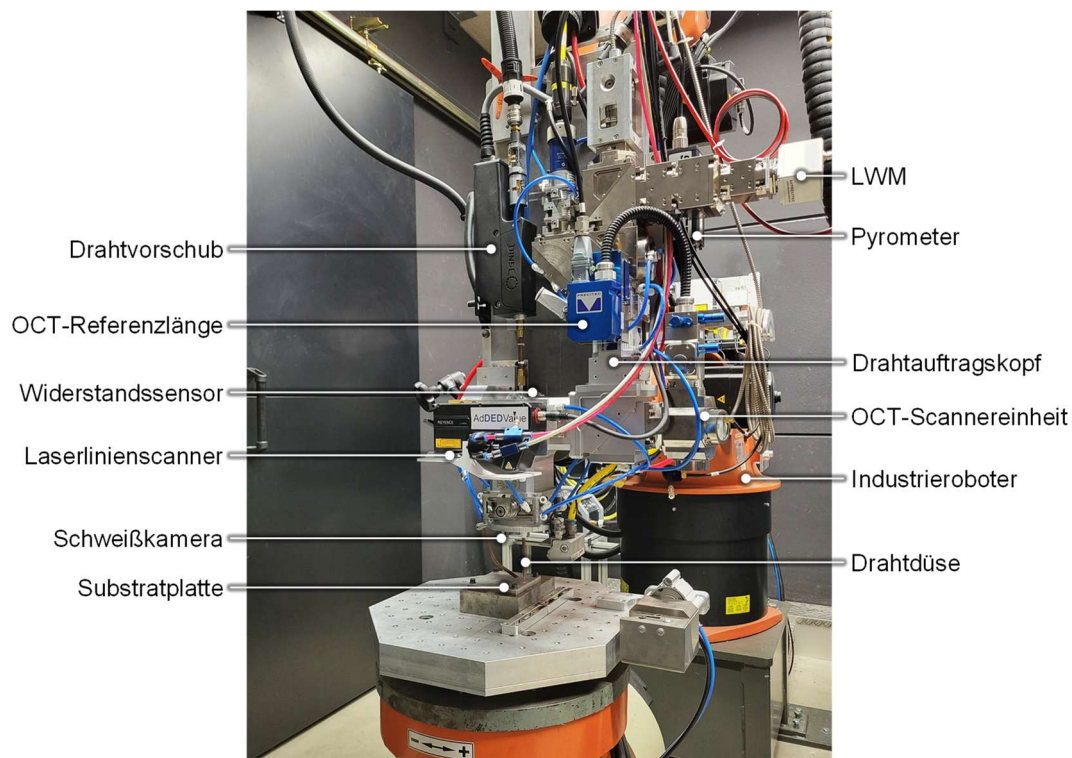


Abbildung 34: Im Projektverlauf stetig weiterentwickelte LMD-Anlage mit integrierten Sensoren zur Prozessüberwachung

**Zielerreichung:** Das Ziel dieses AP wurde vollständig erreicht.

### Arbeitspaket 8.3: WAAM

Im Projektverlauf wurde die WAAM-Anlage am *iwb* mit Sensorik zur Prozessüberwachung erweitert. Dies umfasste die Integration von Messsystemen zur Erfassung des thermischen Prozessverhaltens durch Thermoelemente und einer Thermografie-Kamera sowie die Möglichkeit zur Verformungsmessung der Substratplatte über Wegaufnehmer. Darüber hinaus wurde die kontinuierliche Überwachung von Prozessgrößen wie der Stromstärke und der Spannung durch geeignete Sensorik implementiert. Die Kompatibilität der Datenschnittstellen wurde erfolgreich getestet und die Vor- und Nachbearbeitungsschritte können an einem Arbeitsplatz umgesetzt werden, was eine durchgängige Demonstration der Prozesskette ermöglicht.

Auf Basis der in AP 5.2 erarbeiteten simulationsgestützten Prozessplanung wurde ein Demonstratorbauteil ausgelegt, die erforderlichen Prozessparameter abgeleitet und das Bauteil anschließend an der WAAM-Anlage gefertigt. Abbildung 35 zeigt die Versuchsanlage sowie das gefertigte Demonstratorbauteil.

Die erarbeitete Prozesskette wurde erfolgreich durchlaufen und die Anlage steht für weitere Untersuchungen sowie für öffentlichkeitswirksame Demonstrationen der WAAM-Prozesskette am *iwb* zur Verfügung.

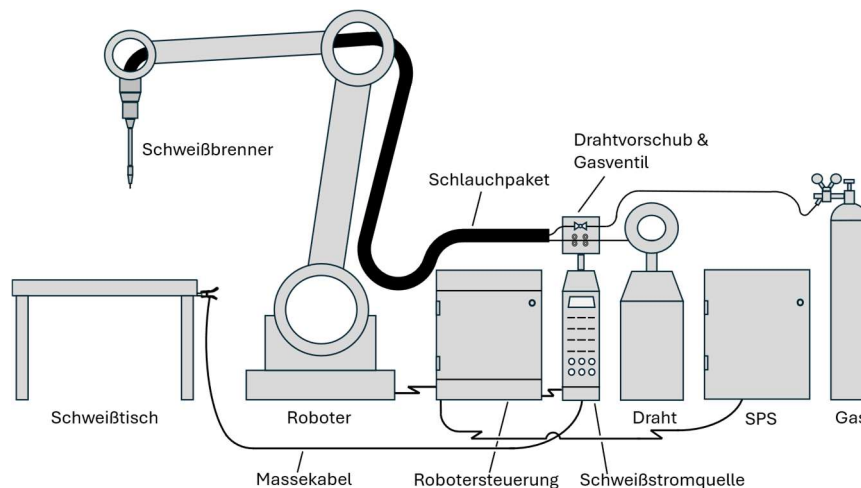


Abbildung 35: Im Projektverlauf stetig weiterentwickelte LMD-Anlage mit integrierten Sensoren zur Prozessüberwachung, SPS: speicherprogrammierbare Steuerung

**Zielerreichung:** Das Ziel dieses AP wurde vollständig erreicht. Die WAAM-spezifischen Ergebnisse des Forschungsprojekts wurden erfolgreich an einer funktionsfähigen Demonstrator-Anlage zusammengeführt. Die gesamte Prozesskette, einschließlich der simulationsgestützten Prozessplanung, konnte anhand der Fertigung eines WAAM-Bauteils demonstriert werden.

### Arbeitspaket 8.4: Fräsende Nachbearbeitung

– Diese Textstelle inklusive der Abbildung 36 wurde noch nicht veröffentlicht. Sie wurde aufgrund einer noch nicht abgeschlossenen Promotion gestrichen. –

**Zielerreichung:** Das Ziel dieses AP wurde vollständig erreicht. Im Rahmen der vom *iwb* durchgeführten Prozessschritte zur spanenden Nachbearbeitung des Demonstratorbauteils wurden insbesondere die Prüfmethode zu Sicherung der Rohteil- und Rohteilmodellqualität angewendet.

## 2.2 Verwertung der Ergebnisse

### 2.2.1 Voraussichtlicher Nutzen der Projektergebnisse

Im Projekt **AdDEDValue** wurden Erkenntnisse im Bereich der Anwendung von DED-Verfahren erarbeitet, die einen wesentlichen Beitrag für die zukünftige Entwicklung dieser Verfahren leisten. Damit besteht die Aussicht, die beforschten DED-Verfahren zur flexiblen und ressourcenschonenden Herstellung von kostenreduzierten Serienbauteilen in verschiedenen Losgrößen einzusetzen. An den gewählten Anwendungsbeispielen wurden die aus den Innovationen resultierenden Vorteile aufgezeigt.

Diese Innovationen umfassen

- hochflexible und ressourcenschonende DED-Fertigungstechnologien,
- eine ganzheitliche Prozesssensorik mit Prozessregelung und ein Auswertesystem,
- eine intelligente Prozessplanung basierend auf Modellbildung und Simulation,
- ein Inline-Qualitätssicherungswerkzeug,
- ein Konzept zur spanenden Endbearbeitung sowie
- eine Methode zur wertschöpfenden Nutzung der Produktionsdaten entlang der gesamten Lieferkette.

Durch die gewonnenen Erkenntnisse wurde das allgemein zugängliche Wissen im Hinblick auf die untersuchten Prozesse und deren Einsatz maßgeblich erweitert. Dabei wurden aktuelle Forschungsfragen detailliert beleuchtet. Neben dem generierten Prozesswissen sind insbesondere die Methoden zur Erfassung von Prozessdaten mittels Sensorik, zur zuverlässigen Interpretation dieser Daten sowie zu deren Nutzung für die Inline-Qualitätssicherung und Prozessregelung verstärkt hervorzuheben. Diese Methoden weisen eine hohe Übertragbarkeit auf weitere (additive) Fertigungsverfahren auf und besitzen damit ein hohes Potenzial für vielfältige Anwendungsfälle über die Fahrzeugindustrie hinaus.

Grundlegende und verallgemeinerbare Erkenntnisse wurden in wissenschaftlichen Publikationen und auf nationalen und internationalen Konferenzen (s. u.) veröffentlicht. Dabei hat die TUM aufgrund ihrer Stellung als Hochschule im Konsortium sowie aufgrund der hervorragenden Vernetzung mit führenden Forschungseinrichtungen und Instituten eine zentrale Rolle eingenommen. Zudem sind im Rahmen des Projektes drei Promotionen der wissenschaftlichen Mitarbeitenden und die damit einhergehende ausführliche Veröffentlichung der Forschungsergebnisse in Form von drei Dissertationen geplant. Die Verteidigung der ersten Promotion findet am 1. Juli 2025 statt (Thema: Closed-Loop Control of Laser Metal Deposition with Coaxial Wire Feeding). Die zweite Dissertation (Arbeitstitel: Simulationsgestützte Reduzierung des Bauteilverzugs bei der draht- und lichtbogenbasierten Additiven Fertigung) befindet sich in der Finalisierungsphase und die dritte Dissertation (Arbeitstitel: Coordinate System Transfer Process for Machining of Wire and Arc Additively Manufactured Components) wird derzeit noch erstellt. An den Titeln ist erkennbar, dass der Digitalisierungsaspekt, unter dem **AdDEDValue** stand, auch bei den Promotionsvorhaben einen bedeutenden Stellenwert einnimmt/einnimmt. Im universitären Bereich wurden ausgewählte Projektergebnisse im Rahmen von Vorlesungen und Praktika (z. B. Hochschulpraktikum Additive Fertigung) den Studierenden nähergebracht, wodurch das Bewusstsein kommender Fachkräftegenerationen für die rasante Entwicklung der generativen Verfahren gestärkt wurde. Weiterhin wurden Studierenden im Rahmen von Abschlussarbeiten (Bachelor/Master) und Semesterarbeiten aktiv eingebunden. Durch die praxisnahe Ausbildung in Verbindung mit innovativen Fertigungstechnologien wurde das Interesse und die Begeisterung für ingenieurwissenschaftliche Berufe gesteigert und die zukünftige Ausbildung hochqualifizierter Ingenieurinnen und Ingenieure an der TUM sichergestellt. Darüber hinaus stehen die im Projekt aufgebauten bzw. weiterentwickelten Demonstratoranlagen an der TUM nach Projektende für weitere Untersuchungen sowie für öffentlichkeitswirksame Demonstrationen zur Verfügung.

Darüber wurde ein intensiver Austausch mit externen Innovationsträgern und Forschungsverbänden durch die Vorstellung der Projektergebnisse auf dem Augsburger Seminar für Additive Fertigung durchgeführt.

Weiterhin wurden verschiedene Messeauftritte (s. u.) zur Verbreitung der Ergebnisse durchgeführt. Soziale Netzwerke wie LinkedIn wurden genutzt, um Inhalte wie Videos und Bilder von Projekterfolgen zeitgemäß und öffentlichkeitswirksam zu kommunizieren.

## 2.2.2 Projektbeeinflussende Ergebnisse Dritter während der Projektlaufzeit

Während der Projektlaufzeit wurden keine projektbeeinflussenden Ergebnisse Dritter bekannt.

## 2.2.3 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen

### Zeitschriftenartikel:

- Bernauer, C., Merk, T., Zapata, A., Zaeh, M. F., 2022. Laser Metal Deposition with Coaxial Wire Feeding for the Automated and Reliable Build-Up of Solid Metal Parts, in Key Engineering Materials 926, o. Nr., S. 65–79.
- Bernauer, C. J., Zapata, A., Kick, L., Weiss, T., Sigl, M. E., Zaeh, M. F., 2022. Pyrometry-based closed-loop control of the melt pool temperature in Laser Metal Deposition with coaxial wire feeding, in Procedia CIRP 111, o. Nr., S. 296–301.
- Bernauer, C., Zapata, A., Zaeh, M. F., 2022. Toward defect-free components in laser metal deposition with coaxial wire feeding through closed-loop control of the melt pool temperature, in Journal of Laser Applications 34, 4, 42044.
- Bernauer, C., Meinzinger, L., Zapata, A., Zhao, X. F., Baehr, S., Zaeh, M. F., 2023. Design and Investigation of a Novel Local Shielding Gas Concept for Laser Metal Deposition with Coaxial Wire Feeding, in Applied Sciences 13, 8, 5121.
- Bernauer, C., Sigl, M. E., Grabmann, S., Merk, T., Zapata, A., Zaeh, M. F., 2024. Effects of the thermal history on the microstructural and the mechanical properties of stainless steel 316L parts produced by wire-based laser metal deposition, in Materials Science and Engineering: A 889, o. Nr., 145862.
- Bernauer, C., Leitner, P., Zapata, A., Garkusha, P., Grabmann, S., Schmoeller, M., Zaeh, M. F., 2024. Segmentation-based closed-loop layer height control for enhancing stability and dimensional accuracy in wire-based laser metal deposition, in Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 86, o. Nr., 102683.
- Bernauer, C., Thiem, S., Garkusha, P., Geiger, C., Zaeh, M. F., 2024. Real-time monitoring and control of the layer height in laser metal deposition with coaxial wire feeding using optical coherence tomography, in Journal of Laser Applications 36, 4, 042028.
- Kutscherauer, L., Bernauer C., Geiger, C., Zaeh, M. F., 2025. Toward a Fully Controlled Wire-Based Laser Metal Deposition Process Through Layer-to-Layer Melt Pool Temperature Control, in Production at the Leading Edge of Technology, in press.
- Zhao, X. F., Panzer, H., Zapata, A., Riegger, F., Baehr, S., Zaeh, M. F., 2025. Deposition sequence optimization for minimizing substrate plate distortion using the simplified WAAM simulation, in Journal of Manufacturing Systems 81, o. Nr., S. 103–116.
- Zhao, X. F., Zapata, A., Zaeh, M. F., 2024. A semi-analytical approach to wire arc additive manufacturing simulation for deposition sequence optimization, in Virtual and Physical Prototyping 19, 1, e2368648.
- Zhao, X. F., Wimmer, A., Zaeh, M. F., 2023. Experimental and simulative investigation of welding sequences on thermally induced distortions in wire arc additive manufacturing, in Rapid Prototyping Journal 29, 11, S. 53–63.

- Bloier, M., Mayer, M. M., Kuntz, S. P., Sigl, M. E., Zaeh, M. F., 2024. Method for a reliable and cost-efficient coordinate system transfer process for machining wire arc additively manufactured parts, in Procedia CIRP 130, o. Nr., S. 21–27.

#### **Wissenschaftliche Vorträge (nur Vortragende/r genannt):**

- Bernauer, C. Drahtbasiertes Laserauftragschweißen mit koaxialer Strahlführung, in 8. Jointventure Leichtbau-Workshop, Jointventure GmbH & CoKG. Schloss Hohenkammer, Deutschland. 4. Februar 2022.
- Bernauer, C. Laser Metal Deposition with Coaxial Wire Feeding for the Automated and Reliable Build-up of Solid Metal Parts, in 25th International Conference on Material Forming, The European Scientific Association for Material Forming (ESAFORM). Braga, Portugal. 27. April 2022.
- Bernauer, C. Pyrometry-based closed-loop control of the melt pool temperature in laser metal deposition with coaxial wire feeding, in 12th CIRP Conference on Photonic Technologies, Bayerisches Laserzentrum GmbH. Fürth, Deutschland. 7. September 2022.
- Bernauer, C. Toward defect-free components in laser metal deposition with coaxial wire feeding through closed-loop control of the melt pool temperature, in 41st International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics (ICALEO), Laser Institute of America. Orlando, FL, USA. 18. Oktober 2022.
- Bernauer, C. Prozessüberwachung und -regelung beim drahtbasierten Laserauftragschweißen, in 27. Augsburger Seminar für Additive Fertigung, Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb), Technische Universität München. Garching bei München, Deutschland. 25. Juli 2024.
- Bernauer, C. Real-time monitoring and control of the layer height in laser metal deposition with coaxial wire feeding using optical coherence tomography, in 43rd International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics (ICALEO), Laser Institute of America. Orlando, FL, USA. 4. November 2024.
- Kutscherauer, L. Toward a Fully Controlled Wire-Based Laser Metal Deposition Process Through Layer-to-Layer Melt Pool Temperature Control, in 14<sup>th</sup> Congress of the German Academic Association for Production Technology, Technische Universität Chemnitz. Chemnitz, Deutschland. 4. Dezember 2024.
- Bloier, M. Method for a reliable and cost-efficient coordinate system transfer process for machining wire arc additively manufactured parts, in 57th CIRP Conference on Manufacturing Systems 2024 (CMS 2024). Povia de Varzim, Portugal. 30. Mai 2024.
- Zhao, X. F. Simulation of Wire Arc Additive Manufacturing in the Reinforcement of a Half-Cylinder Shell Geometry, in ASTM International Conference on Additive Manufacturing, American Society for Testing and Materials (ICAM). Orlando, FL, USA. 4. November 2022

### Weitere Veröffentlichungen und öffentlichkeitswirksame Auftritte:

- Bernauer, C., Bloier, M., Zhao, X. F., 2022. AdDEDValue – Vollautomatisierte Additive Fertigung mit DED-Verfahren für die automobiler Serienproduktion, in *iwb-Newsletter* 28, o. Nr., S. 5–6.
- Präsenz auf diversen Messen, darunter
  - LASER World of PHOTONICS 2022 und 2023
  - Formnext 2022
- Projektvorstellung auf *iwb*-Website:
  - <https://www.mec.ed.tum.de/iwb/forschung-und-industrie/projekte/lasertechnik/addedvalue-vollautomatisierte-additive-fertigung-mit-ded-verfahren-fuer-die-automobile-serienproduktion/> (deutsch)
  - <https://www.mec.ed.tum.de/en/iwb/research-and-industry/projects/laser-technologies/addedvalue-fully-automated-additive-manufacturing-with-ded-processes-for-the-automotive-series-production/> (englisch)
- Bernauer, C. Projektvorstellung an der Partneruniversität Politecnico di Milano im Rahmen eines dreimonatigen Auslandsaufenthaltes zum gegenseitigen fachlichen Austausch
- Zinnel, L., Riegger, F., Bloier, M., Kick, L., Zäh, M. F., 2024. Innovative Prozessketten in der Produktion, in *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 119, 7–8, S. 511–514.

## Literaturverzeichnis

- [1] Handelsblatt, 2020. „Bremsspuren in Bilanzen“ – Warum 2021 für die Autoindustrie schwerer wird als das Coronajahr, <https://www.handelsblatt.com/unternehmen/industrie/serie-branchenausblick-bremsspuren-in-bilanzen-warum-2021-fuer-die-autoindustrie-schwerer-wird-als-das-coronajahr/26725112.html>, zuletzt besucht am 23.12.2024.
- [2] Min, W., Yang, S., Zhang, Y., Zhao, Y., 2019. A Comparative Study of Metal Additive Manufacturing Processes for Elevated Sustainability, in 13<sup>th</sup> International Conference on Micro- and Nanosystems, ASME. Anaheim, CA, USA. 18.–21. August 2019.
- [3] Campatelli, G., Montecchi, F., Venturini, G., Ingarao, G., Priarone, P., 2020. Integrated WAAM-Subtractive Versus Pure Subtractive Manufacturing Approaches: An Energy Efficiency Comparison, in International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology 7, o. Nr., S. 1–11.
- [4] Fuchs, C., Baier, D., Semm, T., Zäh, M. F., 2020. Determining the machining allowance for WAAM parts, in Production Engineering 14, o. Nr., 629–637.
- [5] Fuchs, C., Baier, D., Elitzer, D., Kleinwort, R., Bachmann A., Zäh, M. F., 2019. Additive Fertigung für Flugzeug-Strukturkomponenten, in Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 114, 7–8, S. 431–434.
- [6] Fuchs, C., Semm, T., Zaeh, M. F., 2021. Decision-based process planning for wire and arc additively manufactured and machined parts, in Journal of Manufacturing Systems 59, o. Nr., S. 180–189.
- [7] Zaeh, M. F., Roesch, O., 2014. Improvement of the machining accuracy of milling robots, in Production Engineering 8, 6, S. 737–744.
- [8] Zaeh, M. F., Roesch, O., 2015. Improvement of the static and dynamic behavior of a milling robot, in International Journal of Automation Technology 9, 2, S. 129–133, 2015.
- [9] Schnoes, F., Zaeh, M. F., 2019. Model-based planning of machining operations for Industrial Robots, in Procedia CIRP 82, S. 497–502.
- [10] Zaeh, M. F., Schnoes, F., Obst, B., Hartmann, D., 2020. Combined offline simulation and online adaptation approach for the accuracy improvement of milling robots, in CIRP Annals 69, 1, S. 337–340.
- [11] Busch, M., Schnoes, F., Semm, T., Zaeh, M. F., Obst, B., Hartmann, D., 2020. Probabilistic information fusion to model the pose-dependent dynamics of milling robots, in Production Engineering 14, 4, S. 435–444.
- [12] Dass, A., Moridi, A., 2019. State of the Art in Directed Energy Deposition: From Additive Manufacturing to Materials Design, in Coatings 9, 418.
- [13] Ahn, D., 2021. Directed Energy Deposition (DED) Process: State of the Art, in International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology 8, o. Nr., S. 703–742.
- [14] Liu, W., Tang, Z., Liu, X., Wang, H., Zhang, H., 2017. A Review on In-situ Monitoring and Adaptive Control Technology for Laser Cladding Remanufacturing, in Procedia CIRP 61, o. Nr., S. 235–240.
- [15] Fraunhofer ILT, 2017. Effektiver Verschleiß- und Korrosionsschutz mit dem EHLA-Verfahren, Themenbroschüre.
- [16] Schopphoven, T., Schleifenbaum, J., Voshage, M., Utsch, T., 2019. Laserbeschichtung von Brems scheiben mit angepasster Fertigbearbeitung, in VDI-Z 161, 7–8, S. 48–51.
- [17] Motta, M., Demir, A., Previtali, B., 2018. High-speed imaging and process characterization of coaxial laser metal wire deposition, in Additive Manufacturing 22, o. Nr., S. 497–507.
- [18] Schnitzler, C., Traub, M., 2009. Optisches System für einen Lasermaterialbearbeitungskopf, DE102007018400B4, Deutsches Patent- und Markenamt.
- [19] Kelbassa, J., Pütsch, O., Gasser, A., Biber, A., Wissenbach, K., Loosten, P., Schleifenbaum, J., 2019. Influence of focal length on the laser metal deposition process with coaxial wire feeding, in Proceedings of SPIE 10911, o. Nr., o. Nr.
- [20] Govekar, E., Jeromen, A., Kuznetsov, A., Kotar, M., Kondo, M., 2018. Annular laser beam based direct metal deposition, in Procedia CIRP 74, o. Nr., S. 222–227.
- [21] Jafari, D., Vaneker, T., Gibson, I., 2021. Wire and arc additive manufacturing: Opportunities and challenges to control the quality and accuracy of manufactured parts, in Materials & Design 202, o. Nr., 109471.
- [22] Williams, S., Martina, F., Addison, A., Ding, J., Pardal, G., Colegrove, P., 2016. Wire + Arc Additive Manufacturing, in Materials Science and Technology 32, 7, S. 641–647.
- [23] Everton, S., Hirsch, M., Stravroulakis, P., Leach, R., Clare, A., 2016. Review of in-situ process monitoring and in-situ metrology for metal additive manufacturing, in Materials and Design 95, o. Nr., S. 431–445.

- [24] Tang, Z., Liu, W., Wang, Y., Saleheen, K., Liu, Z., Peng, S., Zhang, Z., Zhang, H., 2020. A review on in situ monitoring technology for directed energy deposition of metals, in *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 108, o. Nr., S. 3437–3463.
- [25] Xia, C., Pan, Z., Polden, J., Li, H., Xu, Y., Chenb, S., Zhang, Y., 2020. A review on wire arc additive manufacturing: Monitoring, control and a framework of automated system, in *Journal of Manufacturing Systems* 57, o. Nr., S. 31–45.
- [26] Garmendia, I., Pujana, J., Lamikiz, A., Madarieta, M., Leunda, J., 2019. Structured light-based height control for laser metal deposition, in *Journal of Manufacturing Processes* 42, o. Nr., S. 20–27.
- [27] Abioye, T. E., Folkes, J., Clare, A. T., 2013. A parametric study of Inconel 625 wire laser deposition, in *Journal of Materials Processing Technology* 213, 12, S. 2145–2151.
- [28] Heralić, A., 2012. Monitoring and control of robotized laser metal-wire deposition. Dissertation. Göteborg, Schweden: Chalmers University of Technology.
- [29] Song, L., Bagavath-Singh, V., Dutta, B., Mazumder, J., 2012. Control of melt pool temperature and deposition height during direct metal deposition process, in *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 58, o. Nr., S. 247–256.
- [30] Wang, Q., Li, J., Gouge, M., Nassar, A. R., Michaleris, P., Reutzel, E. W. Reduced-order multivariable modeling and nonlinear control of melt-pool geometry and temperature in directed energy deposition, in *American Control Conference (ACC), Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). Boston, MA, USA. 6.–8. Juli 2016.*
- [31] Gibson, B. T., Bandari, Y. K., Richardson, B. S., Henry, W. C., Vetland, E. J., Sundermann, T. W., Love, L. J., 2020. Melt pool size control through multiple closed-loop modalities in laser-wire directed energy deposition of Ti-6Al-4V, in *Additive Manufacturing* 32, o. Nr., 100993.
- [32] Kogel-Hollacher, M., Strebel, M., Staudenmaier, C., Schneider, H.-I., Regulin, D., 2020. OCT sensor for layer height control in DED using SINUMERIK® controller, in *Proceedings of SPIE* 11271, o. Nr., o. Nr.
- [33] Qu, D.-X., Berry, J., Calta, N. P., Crumb, M. F., Guss, G., Matthews, M. J., 2020. Temperature Measurement of Laser-Irradiated Metals Using Hyperspectral Imaging, in *Physical Review Applied* 14, o. Nr., 014031.
- [34] Prieto, C., Fernandez, R., Gonzalez, C., Diez, M., Arias, J., Sommerhuber, R., Lücking, F. In situ process monitoring by optical microphone for crack detection in Laser Metal Deposition applications, in *11<sup>th</sup> CIRP Conference on Photonic Technologies (LANE), Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT. Online. 7.–10. September 2020.*
- [35] Hagqvist, P., 2015. Non-intrusive instrumentation and estimation: Applications for control of an additive manufacturing process. Dissertation, Göteborg, Schweden: Chalmers University of Technology.
- [36] Farshidianfar, M. H., Khodabakhshi, F., Khajepour, A., Gerlich, A. P., 2021. Closed-loop control of microstructure and mechanical properties in additive manufacturing by directed energy deposition, in *Materials Science and Engineering: A* 803, o. Nr., 140483.
- [37] Teichmann, E. W., Kelbassa, J., Gasser, A., Tarner, S., Schleifenbaum, J. H., 2021. Effect of wire feeder force control on laser metal deposition process using coaxial laser head, in *Journal of Laser Applications* 33, o. Nr., 12041.
- [38] Baufeld, B., van der Biest, O., Gault, R., Ridgway, K., 2011. Manufacturing Ti-6Al-4V Components by Shaped Metal Deposition: Microstructure and Mechanical Properties, in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 26, o. Nr., 12001.
- [39] Brandl, E., Baufeld, B., Leyens, C., Gault, R., 2010. Additive manufactured Ti-6Al-4V using welding wire: comparison of laser and arc beam deposition and evaluation with respect to aerospace material specifications, in *Physics Procedia* 5, B, S. 595–606.
- [40] Qiu, Z., Wu, B., Zhu, H., Wang, Z., Hellier, A., Ma, Y., Li, H., Muransky, O., Wexler, D., 2020. Microstructure and mechanical properties of wire arc additively manufactured Hastelloy C276 alloy, in *Materials & Design* 195, o. Nr., 109007.
- [41] Yi, H.-J., Kim, J.-W., Kim, Y.-L., Shin, S., 2020. Effects of Cooling Rate on the Microstructure and Tensile Properties of Wire-Arc Additive Manufactured Ti-6Al-4V Alloy, in *Metals and Materials International* 26, 3, S. 1235–1246.
- [42] Zhu, H., Ma, Y., Wei, T., Li, H., Aughterson, R., Lumpkin, G., 2019 The formation and Kr-ion irradiation behaviour of new microstructural features in additively manufactured titanium aluminium alloy, in *Additive Manufacturing* 195, 2, S. 654 – 667.
- [43] Wu, B., Ding, D., Pan, Z., Cuiuri, D., Li, H., Han, J., Fei, Z., 2017. Effects of heat accumulation on the arc characteristics and metal transfer behavior in Wire Arc Additive Manufacturing of Ti6Al4V, in *Journal of Materials Processing Technology* 250, S. 304–312.
- [44] Yang, D., Wang, G., Zhang, G., 2017. Thermal analysis for single-pass multi-layer GMAW based additive manufacturing using infrared thermography, in *Journal of Materials Processing Technology* 244, o. Nr., S. 215–224.

- [45] Ding, J., Colegrove, P., Mehnen, J., Ganguly, S., Sequeira Almeida, P.M., Wang, F., Williams, S., 2011. Thermo-mechanical analysis of Wire and Arc Additive Layer Manufacturing process on large multi-layer parts, in *Computational Materials Science* 50, 12, S. 3315 – 3322.
- [46] Cambon, C., Rouquette, S., Bendaoud, I., Bordreuil, C., Wimpory, R., Soulie, F., 2020. Thermo-mechanical simulation of overlaid layers made with wire + arc additive manufacturing and GMAW-cold metal transfer, in *Welding in the World* 64, o. Nr., S. 1427–1435.
- [47] Li, R., Xiong, J., 2019. Influence of interlayer dwell time on stress field of thin-walled components in WAAM via numerical simulation and experimental tests, in *Rapid Prototyping Journal* 25, 8, S. 1433–1441.
- [48] Bähr, M., Buhl, J.B., Radow, G., Schmidt, J., Bambach, M., Breuß, M., Fügenschuh, A., 2021. Stable honeycomb structures and temperature based trajectory optimization for wire-arc additive manufacturing, in *Optimization and Engineering* 22, o. Nr., 913–974.
- [49] Li, S. Chen, J. Shi, H. Tian, and Y. Zhao, 2017. Evaluation and Optimization of a Hybrid Manufacturing Process Combining Wire Arc Additive Manufacturing with Milling for the Fabrication of Stiffened Panels, in *Applied Sciences* 7, 12, 1233.
- [50] Veiga, F., Gil Del Val, A., Suárez, A., Alonso, U., 2020. Analysis of the Machining Process of Titanium Ti6Al-4V Parts Manufactured by Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM), in *Materials* 13, 3, 766.
- [51] Rösch, O., 2014. Steigerung der Arbeitsgenauigkeit bei der Fräsbearbeitung metallischer Werkstoffe mit Industrierobotern. Dissertation. München: Technische Universität München.
- [52] Iglesias, I., Sebastián, M. A., Ares, J. E., 2015. Overview of the State of Robotic Machining: Current Situation and Future Potential, in *Procedia Engineering* 132, o. Nr., S. 911–917.
- [53] Karim, A., Hitzer, J., Lechler, A., Verl, A. Analysis of the dynamic behavior of a six-axis industrial robot within the entire workspace in respect of machining tasks, in *International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics AIM*, IEEE Robotics & Automation Society. München, Deutschland. 3.–7. Juli 2017.
- [54] Cordes, M., Hintze, W., Altintas, Y., 2019. Chatter stability in robotic milling, in *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 55, A, S. 11–18.
- [55] Abele, E., Bauer, J., Pischian, M., Stryk, O., Friedmann, M., Hemker, T., 2010. Prediction of the tool displacement for robot milling applications using coupled models of an industrial robot and removal simulation, in *Proceedings of the CIRP 2<sup>nd</sup> International Conference Process Machine Interactions* o. Nr., o. Nr., S. 223 – 230.
- [56] Huynh, H. N., Assadi, H., Rivière-Lorphèvre, E., Verlinden, O., Ahmadi, K., 2019. Modelling the dynamics of industrial robots for milling operations, in *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 61, o. Nr., 101852.
- [57] Nguyen, V., Cvitanic T., Melkote, S., 2019. Data-Driven Modeling of the Modal Properties of a Six-Degrees-of-Freedom Industrial Robot and Its Application to Robotic Milling, in *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 141, 12, 121006.
- [58] Zaeh, M. F., Roesch, O., 2015. Improvement of the static and dynamic behavior of a milling robot, in *International Journal of Automation Technology* 9, 2, S. 129–133.
- [59] Schiefer, H., Schiefer, F., 2018. *Statistik für Ingenieure – Eine Einführung mit Beispielen aus der Praxis*, Berlin: Springer Vieweg, S. 29.
- [60] Bloier, M., Mayer, M. M., Kuntz S. P., Sigl, M. E., Zaeh, M. F., 2024. Method for a reliable and cost-efficient coordinate system transfer process for machining wire arc additively manufactured parts. *Procedia CIRP* 130, o. Nr., S. 5.