Bei diesem Beitrag handelt es sich um einen wissenschaftlich begutachteten und freigegebenen Fachaufsatz („reviewed paper“).

doi.org/10.37544/1436-4980-2025-05-42

Analyse multimodaler und defektkorrelierter Daten als Grundlage für KI-gestützte Modelle

Multimodale Datenanalyse im Laserauftragschweißen

C. Hauschopp, S. Dicks, R. Kraft, J. Bremer, D. Wall, N. Brierley, C. Häfner

ZUSAMMENFASSUNG Das Laserauftragschweißen ist ein komplexer Fertigungsprozess, der durch umfassende multimodale Prozessüberwachung digital abgebildet werden kann. Dieser Beitrag behandelt die Integration von Sensorik, die ortsaufgelöste Datenerfassung und -analyse sowie die Überlagerung und Korrelation von Prozessdaten mit CT-basierten Defektmasken. Durch die Vernetzung aller Schnittstellen wird ein automatisiertes Konzept entwickelt, das die Generierung von Daten für zukünftige KI-Modelle erheblich erleichtert.

STICHWÖRTER

Laserauftragschweißen, Datenanalyse, Prozessüberwachung

Multimodal Data Analysis in Laser Material Deposition

ABSTRACT Laser Material Deposition is a complex manufacturing process that can be digitized by comprehensive multimodal process monitoring. This article deals with the integration of sensor technology, spatially resolved data acquisition and analysis, and the overlay and correlation of process data with CT-based defect masks. By linking all interfaces, an automated concept is developed that significantly facilitates the generation of data for future AI models.

1 Einleitung

Das Laserauftragschweißen (engl.: DED-LB/M oder Laser Material Deposition, kurz LMD) ist ein additives Fertigungsverfahren. Durch Laserstrahlung wird ein Schmelzbad auf einer Bauteiloberfläche erzeugt und ein Zusatzwerkstoff durch eine Düse zugeführt. Das Verfahren ist industriell etabliert und wird für Anwendungen im Bereich der Beschichtung, Reparatur oder Additiver Fertigung (AM) genutzt [1; 2]. Der Prozess unterliegt einer Vielzahl von Parametern, was eine komplexe Prozessführung und den Einsatz von Expertenwissen erfordert. Durch veränderliche Rahmenbedingungen, wie variable Bauteilgeometrien, eine Vielzahl an Werkstoffen oder variierende Pulverqualität, wird die Komplexität des Prozesses weiter gesteigert. Dies führt zu zeit- und kostenintensiven Prozessentwicklungen, kann jedoch auch Abweichungen in der Bauteilqualität oder einen Verlust an Effizienz bewirken. Der Einsatz einer sensorbasierten Prozessüberwachung kann hier Abhilfe schaffen. Durch die Akquisition diverser Prozessdaten können Rückschlüsse auf Abweichungen der Prozessstabilität geschlossen werden. In der Fachliteratur werden verschiedene Methoden der Prozessüberwachung bei LMD-Prozessen beschrieben [2–4], bei denen die Aufnahme der Prozesssignatur zur Regelung des Prozesses genutzt wird. In der Regel werden dazu einzelne Sensoren eingesetzt, wie exemplarisch ein Pyrometer zur Messung der Schmelztemperatur oder eine Kamera zur Messung der Schmelzbadgeometrie und -intensität. Bei dieser Art von Regelung werden ohne redundante Messungen Fehlinterpretationen der Sensoren nicht identifiziert. Zudem liegen keine Informationen über eine ortsaufgelöste Defektbildung vor, da die Daten zumeist nur zeitaufgelöst erfasst werden und keine Überlagerung mit Mikrostrukturaufnahmen erfolgt.

Der in diesem Beitrag präsentierte Ansatz beschreibt die Entwicklung einer multivariablen Prozessüberwachung, welche die Daten multipler Sensoren synchronisiert und ortsaufgelöst aufnimmt. Als Sensoren kommen hierbei simultan ein Pyrometer, eine Kamera zur Überwachung des Schmelzbads, ein Sensor basierend auf der Optischen Kohärenztomographie (OCT) sowie ein Laserlinienscanner zum Einsatz, welche mit dem Werkzeugmittelpunkt eines Schweißroboters synchronisiert werden. Mittels nachgelagerter computertomographischer Aufnahmen werden die Prozessdaten mit dreidimensionalen Defektmasken überlagert und die Daten mit der Ausbildung von Defekten korreliert.

2 Bestehende Ansätze der sensorbasierten, adaptiven Prozessführung

Diverse Forschungstätigkeiten untersuchen eine Anwendung von Sensoren im Bereich des pulverbasierten Laserauftragschweißens zur Sicherstellung einer angemessenen Bauteilqualität. Im Zuge einer Echtzeitregelung auf Basis einer in-situ Messdatenaufnahme werden Prozessinstabilitäten vermieden. Ein Großteil der dafür verwendeten Sensoren basiert auf optischer Messtechnik. Eine Anwendung dieser Messmethodik ermöglicht eine koaxiale Integration der Sensorik in den Strahlengang der Laserbearbeitungsoptik, wodurch eine kontaktlose Messung realisierbar ist. [5; 6]

Die überwiegende Mehrheit der im Laserauftragschweißen eingesetzten Sensorik zur Prozessüberwachung basiert auf der Detektion der aus dem Schmelzbad emittierten Wärmestrahlung.

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2025-05-42, am 30.05.2025, 09:40:24
Open Access – (cc) BY – https://elibrary.vdi-verlag.de/de/agb

Unter den Kamerasystemen sind Charged-Coupled Devices- (CCD) und Complementary Metal-Oxide-Semiconductor- (CMOS) Bildsensoren gebräuchlich. Diese dienen einer zweidimensional aufgelösten Temperaturmessung, der Schmelzbadüberwachung und können bei lateraler Positionierung Schichthöhen aufzeichnen. Als eindimensionale Alternative der Temperaturaufzeichnung stehen Pyrometer zur Verfügung, welche zumeist in der Bauform des Quotientenpyrometers vorzufinden sind. [2; 7] Weitere Technologien auf Basis der emittierten Wärmestrahlung existieren, diese werden hier nicht weiter aufgeführt.

Die optische Kohärenztomographie (OCT) ist für die Medizintechnik als bildgebendes Verfahren lichtdurchlässiger Materialien entwickelt worden [8]. Neben diversen medizinischen Anwendungen ist dieses Verfahren auch für Distanzmessungen opaker Objekte nutzbar [1]. Die Spectral-Domain-OCT (SD-OCT) ist aufgrund der Sensitivität und hohen Scangeschwindigkeiten als Unterart der Fourier-Domain-OCT (FD-OCT) weit verbreitet [9]. Erste Anwendungen der OCT im pulverbasierten Laserauftragschweißen wurden bereits erfolgreich erprobt [10; 11], jedoch existiert bisher keine tiefgreifende wissenschaftliche Untersuchung. *Kittel et al.* [11] verwendete einen OCT-Sensor mit ellipsenförmiger Messtrajektorie zur Regelung des Arbeitsabstandes im pulverbasierten LMD-Prozess. Hierdurch konnte der Fehler des Arbeitsabstandes in Einzelspurversuchen auf Freiformflächen auf unter 0,1 mm reduziert werden.

Eine geschlossene Regelung der Schmelzbadtemperatur wurde von *Smoqi et al.* [12] durch den Einsatz eines zweikanaligen Pyrometers zur Echtzeit-Temperaturmessung realisiert. Auf Grundlage dieser Messwerte wurde die Laserleistung kontinuierlich angepasst, um die Schmelzbadtemperatur konstant zu halten. Dadurch konnte eine homogenere Mikrostruktur, reduzierte Porosität und eine geringere Schwankung der Mikrohärte im Vergleich zu offenen Prozessen mit festen Parametern erzielt werden. *Freeman et al.* [13] überwachte die Schmelzbadbreite mithilfe einer koaxialen Kamera. Auf Grundlage dieser Messungen wurde die Laserleistung in Echtzeit angepasst, um eine konstante Schmelzbadbreite zu gewährleisten. Dieser Regelungsansatz führte zu einer signifikanten Reduzierung der Variabilität der mechanischen Eigenschaften und eliminierte die Auswirkungen der Bauteilgeometrie. Eine Regelung des pulverbasierten LMD-Prozesses unter Berücksichtigung mehrerer Messwerte ist bisher nicht dokumentiert.

Die Analyse von Messdaten ausschließlich als Zeitreihen ist nicht hinreichend, da hierbei die Auswirkungen der Aufbaustrategie und der Bauteilgeometrie nur eingeschränkt berücksichtigt werden können. Hierfür ist eine Ortsauflösung der Messdaten erforderlich. Erst durch die räumlich differenzierte Analyse benachbarter Messpunkte können spezifische lokale Zusammenhänge und strukturelle Muster identifiziert werden. Durch den Zugriff auf die Steuerung der Werkzeugmaschine oder des Roboters über eine Schnittstelle können die zeitaufgelösten Positionsdaten des Werkzeugmittelpunkts (Tool Center Point – TCP) extrahiert werden. Die Synchronisation der beiden zeitaufgelösten Datensätze erfolgt anhand der Zeitstempel, wodurch eine präzise räumliche Zuordnung der Messdaten im additiv gefertigten Bauteil ermöglicht wird. [14] Des Weiteren erlaubt die ortsaufgelöste Sensordatenerfassung eine Kombination mit nachgelagerten zerstörungsfreien ortsaufgelösten Analyseverfahren, wie der Porositätsanalyse mittels Computertomographie (CT). Dies wurde bisher jedoch noch nicht umgesetzt.

Eine Adaption der Bahnplanung mit dem Ziel der Anpassung an individuelle Bauteile ist durch diverse Untersuchungen erfolgreich demonstriert und in einigen Lösungen kommerzialisiert worden [15]. Ebenso konnte eine Regelung der erzielten Aufbaugeometrie durch Analyse geometrischer Messdaten und Adaption einzelner Prozessparameter erfolgreich demonstriert werden [16]. Bisher nicht demonstriert wurde eine Zusammenführung der Lösungen für die geometrische Erfassung von Bauteilen, der adaptiven Bahnplanung sowie der multisensorischen Erfassung des Prozesses. Ebenfalls konnten bisher nur einzelne Datenquellen für die Regelung des Prozesses anhand eines einzelnen Stellparameters verwendet werden.

3 Methodik und Versuchsdurchführung

Um die bestehenden Ansätze der sensorbasierten Prozessüberwachung um einen multimodalen Ansatz zu erweitern, wird in dieser Arbeit ein 6-Achs-Industrieroboter mit einer Optik für das Laserauftragschweißen, mit berührungsloser Sensorik sowie mit einer Datenerfassungsschnittstelle ausgestattet. Durch das Aufschweißen von Grundgeometrien in Form von Quadern werden erste Daten aufgenommen und die Datenerfassungs-Pipeline validiert. Mithilfe eines Laserlinienscanners wird die aufgeschweißte Geometrie vor dem Auftragschweißprozess sowie nach Prozessende erfasst. In einer anschließenden computertomographischen Analyse werden mikrostrukturelle Defektverteilungen der Proben generiert und erstmalig mit den Prozessdaten unter Verwendung der nach Prozessende anlagenintegriert erfassten Geometriedaten überlagert. Um die Schritte der Datenerfassung und der geometrischen Überlagerung zu automatisieren, wird die systematische Verknüpfung aller Schnittstellen innerhalb einer spezialisierten Softwareanwendung umgesetzt. Anhand der ortsaufgelösten, überlagerten Daten werden Korrelationen zwischen Prozessdaten und der Ausbildung von Defekten hergestellt. In dieser Betrachtung wird der Schwerpunkt auf die multimodale Datenerfassung gelegt, um Fehlinterpretationen zu reduzieren und eine robuste Früherkennung von Prozessanomalien zu ermöglichen.

Als Werkzeugmaschine wird ein 6-Achs Roboter des Typs „KR 90 R3100 HA“ von Kuka mit einer „KR C4“ Steuerung eingesetzt. Für die Erzeugung eines Laserstrahls wird ein Laserline „LDF 5000-30“ Diodenlaser mit einer Wellenlänge von 940-1060 nm in Kombination mit einer neuartigen „YC52“ Laserschweißoptik von Precitec verwendet. Es resultiert eine Top-Hat Intensitätsverteilung bei einem eingestellten Strahldurchmesser von d_L = 1,6 mm in der Bearbeitungsebene. Das Pulver wird dem Prozess über eine koaxiale HD Sonderoptiken „HighNo 4.0“ Ringspaltdüse zugeführt, welche über eine XY-Verstelleinheit zum Laserstrahl ausgerichtet wird und typische Pulverfokusdurchmesser von circa d_P = 1 mm erreicht. Der Soll-Arbeitsabstand und damit der Fokusabstand von der Pulverdüse beträgt 9 mm.

An der Laserschweißoptik wird berührungslose Sensorik integriert, welche in der **Tabelle** mit den technischen Daten der Hersteller aufgeführt ist. Die Ausrichtung der Sensorik erfolgt koaxial zum Laserstrahl, während der Laserlinienscanner seitlich an der Optik montiert wird. Das Scannen zur Erfassung der Substrat- und Bauteilgeometrie erfolgt vor und nach Abschluss des Schweißprozesses. Die Analog-Messwerte des Pyrometer- und OCT-Signals werden mithilfe eines National Instruments cDAQ 9185 Datenakquisitionsmoduls erfasst und mit den Daten der

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2025-05-42, am 30.05.2025, 09:40:24
Open Access – (cc) BY – https://elibrary.vdi-verlag.de/de/agb

Tabelle. Verwendete Sensorik

Typ Bezeichnung	Technische Daten	Messgröße
Quotientenpyrometer Mergenthaler Lascon LPC04	Temperaturbereich: 250-3000 °C Genauigkeit: < 1500 °C: 0,5 % ± 2K Frequenz: 10 kHz Wellenlänge: 1,65-2,1 µm (2-Kanal)	Schmelzbadtemperatur
CMOS-Kamera Basler acA1600-60gm	Aufnahmerate: 60 fps Auflösung: 1602 x 1202 px	Schmelzbadintensität und -geometrie
Kurzkohärenz-Interferometer Precitec IDM1550 SD-OCT	Wellenlänge: 1550 nm Messbereich: 16 mm Messauflösung: 10 µm Frequenz: 70 kHz	Schweißspurhöhe
Laserlinienscanner µ-Epsilon 2950-BL	Messbereich: 50 mm Linien-Linearität: 4 µm ± 0,008 % (in z)	Substrat- und Bauteilgeometrie

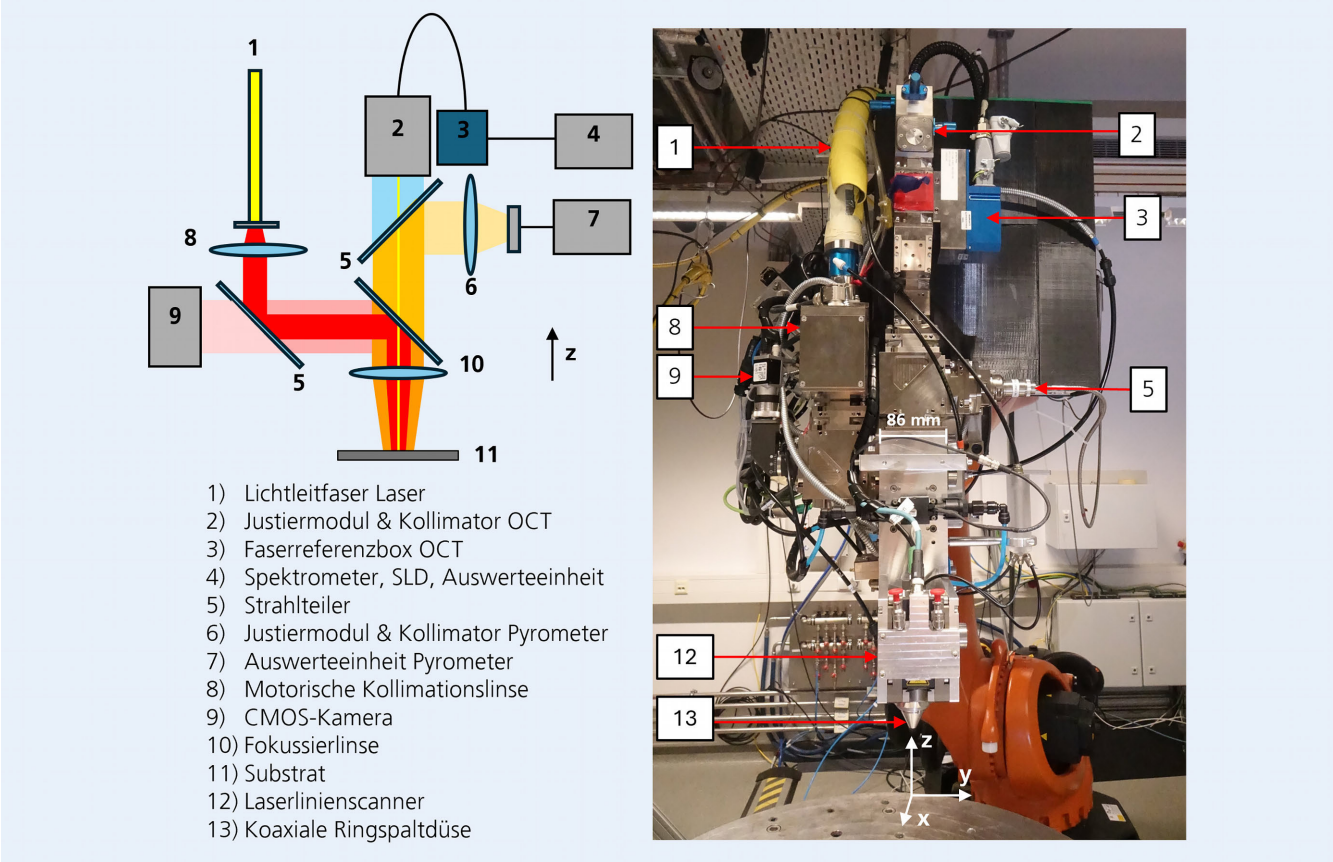

Bild 1. Verwendete Anlagenkonfiguration inklusive Precitec Schweißoptik und integrierter Sensorik. *Foto: Fraunhofer ILT*

CMOS-Kamera überlagert. Die Positionsdaten des Roboter TCP werden über den „FastSendDriver“ von Kuka übergeben und bei einer Aufnahmerate von 1 kHz mit den Prozessdaten synchronisiert. Eine vollständige Übersicht der Konfiguration ist in **Bild 1** dargestellt. Für die computertomographischen Aufnahmen wird eine „Diondo d2“ Mikrofokus CT Anlage mit einer 240 kV Röhrenspannung und einem Flächendetektor mit eine Auflösung von 3000 x 3000 Pixeln verwendet. Sämtliche Datenschnittstellen werden in der Software „OpenArms“ der BCT GmbH verknüpft. Durch die umfassenden Schnittstellen können alle Schritte hinsichtlich der Datenerfassung, der Prozessgestaltung, zum Beispiel der Bahnplanung, sowie der CT-Überlagerung durchgeführt und automatisiert werden.

Die Ausrichtung des Pyrometers erfolgt über einen Referenzstrahler mit einstellbarer Blende. Hierzu wird zunächst ein Einbrand auf einem Substrat erzeugt, welcher über die koaxiale CMOS-Kamera abgebildet wird, sodass der Referenzstrahler auf den Einbrand ausgerichtet werden kann. Der Messfleck des Pyrometers wird anschließend über eine Maximierung des Detektorstroms koaxial zum Laserstrahl ausgerichtet und auf eine Messfleckgröße von d_M = 3 mm eingestellt. Nach einem Dunkelabgleich erfolgt eine Kalibrierung über einen Temperaturbereich

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2025-05-42, am 30.05.2025, 09:40:24
Open Access – (cc) BY – https://elibrary.vdi-verlag.de/de/agb

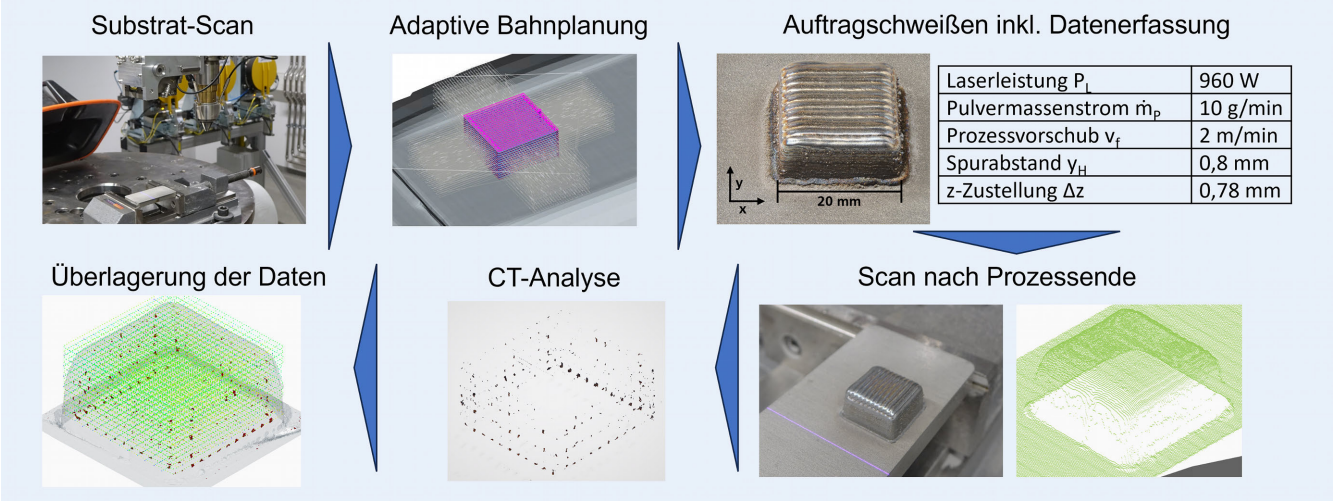

Bild 2. Prozesskette der Datenerfassung. *Grafik: Fraunhofer ILT*

von 900 – 1500 °C. Für die Kompensation von Verlustleistungen der Wärmestrahlung wird eine Temperaturkorrektur mittels Emissionsgradverhältnis vorgenommen. Aus Temperaturmessungen zu Umschmelzversuchen von Inconel 718 Substraten kann ein Emissionsgradverhältnis von $\varepsilon v = 1{,}012$ ermittelt werden.

Um den OCT-Sensor auszurichten, erfolgt zunächst eine z-Justierung mittels eingebautem Justiermodul bis der Messfleck die maximale Intensität erreicht, während in der XY-Ebene eine Ausrichtung über ein Abfahren von erstarrten Kreisspuren erfolgt. Anschließend wird das Messfenster so ausgerichtet, dass der Arbeitsabstand mittig im Detektionsfenster situiert ist. Auf die Messwerte wird jeweils ein gewichteter Medianfilter als auch ein Histogrammfilter angewendet.

Mithilfe der CMOS-Kamera werden monochrome 8-Bit Bilder des Schmelzbades aufgenommen und für das Auswerten von Bildfeatures segmentiert. Hierzu wird der Wert Area_normalized herangezogen, welcher die Anzahl der hellen Pixel über einen Schwellenwert filtert und durch die Anzahl der Gesamtpixel teilt. Weiterhin wird über den Wert Sum_intensity die Summe aller Pixelwerte durch den maximal möglichen Pixelwert geteilt.

Das für die Untersuchungen eingesetzte Pulver entspricht der Nickelbasislegierung Inconel 718 mit der Bezeichnung Nickel 718 der Firma Advanced Powders and Coatings (Boisbriand, Kanada) mit einer Partikelgrößenverteilung von 15 µm – 45 µm. Als Substratwerkstoff wird Edelstahl 1.4301 verwendet.

In der Versuchsreihe werden fünf Referenzwürfel aufgeschweißt. Die Parameter wurden im Vorfeld an Einzelspuren validiert. Für jeden Würfel werden 14 Lagen mit einer Soll-Grundfläche von 20 mm x 20 mm aufgetragen. In diesen Versuchen wird eine Kontur-Hatch-Strategie als Aufbaustrategie angewendet, bei der jede Schicht mit einer Konturfahrt eingeleitet wird, gefolgt von der Auffüllung mittels bidirektionaler Schweißspuren. Zudem erfolgt nach der Fertigstellung jeder Schicht eine Rotation der Ausrichtung der Schweißbahnen um 90°. Vor dem Schweißprozess wird ein Geometriescan der Substratoberfläche mit dem Laserlinienscanner durchgeführt. Mithilfe des Softwaremoduls „OpenScan“ werden die Daten automatisiert zusammengeführt, die Punktewolke vermascht und eine auf die Substratoberfläche angepasste Bahnplanung generiert. Während des Prozesses werden die Daten der analogen Sensorik (Pyrometer, OCT-Sensor) durch das Softwaremodul „OpenData erfasst und mit den Schmelzbadbildern der CMOS-Kamera sowie dem TCP des Roboters synchronisiert. Nach dem Aufschweißen eines Quaders wird die finale Bauteilgeometrie erneut mittels Laserlinienscanner erfasst und automatisiert mit den Prozessdaten der tatsächlichen Bewegung des TCP überlagert. Die Quader werden anschließend vom Substrat getrennt und einer CT-Analyse unterzogen. Für die computertomographischen Untersuchungen werden die Schnittlängen der Schweißproben für eine gute Durchstrahlung sowie eine hohe Auflösung minimiert und ein Durchstrahlen der Substratplatte wird vermieden. Aufgrund der hohen Dichte des verwendeten Werkstoffs Inconel 718 wird eine höhere Röhrenspannung- und Leistung nötig. Die Fehlermasken der Proben werden durch eine Segmentierung basierend auf maschinellen Lernalgorithmen erzeugt. Da die Messung auf Unterschiede in der Röntgenabsorption beruht, kann ein großes Spektrum an Fehlstellen detektiert werden, jedoch sind geschlossene Risse nur eingeschränkt detektierbar.

Die generierten Defektmasken werden mittels eines konfigurierbaren Ausrichtungsablaufes in das Koordinatensystem der Bauteilscans sowie Prozessdaten überführt. Der Algorithmus basiert auf der Methode der kleinsten Quadrate mithilfe derer eine Starrkörpertransformation für eine minimale Differenz zwischen CT und Geometriescan berechnet wird, wobei die auszuwertenden Bereiche sowie weitere Abläufe wie zum Beispiel iterative Ausrichtungen und Einschränkungen der geometrischen Freiheitsgrade der Transformation durch den Benutzer angepasst werden können. Die gesamte Prozesskette ist in **Bild 2** visualisiert.

4 Ergebnisse und Datenanalyse

Die aufgeschweißten Referenzwürfel zeigen eine vollständige Anbindung, eine beständig gute Schweißqualität, jedoch geringfügige Formabweichungen (vgl. **Bild 3**). Mit zunehmender Aufbauhöhe kommt es zu einer Rundung der Kanten an der Oberseite, was eine progressive Verringerung der Grundfläche des Quaders zur Folge hat. Dieser Effekt kann auf eine ungleichmäßige Wärmeverteilung zurückgeführt werden, da Randbereiche durch weniger angrenzendes Volumen verringerte Abkühlraten aufweisen. Durch diese Erwärmung der äußeren Bereiche kommt es zu einer Vergrößerung des Schmelzbades, was einen breiteren jedoch

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2025-05-42, am 30.05.2025, 09:40:24
Open Access – (cc) BY – https://elibrary.vdi-verlag.de/de/agb

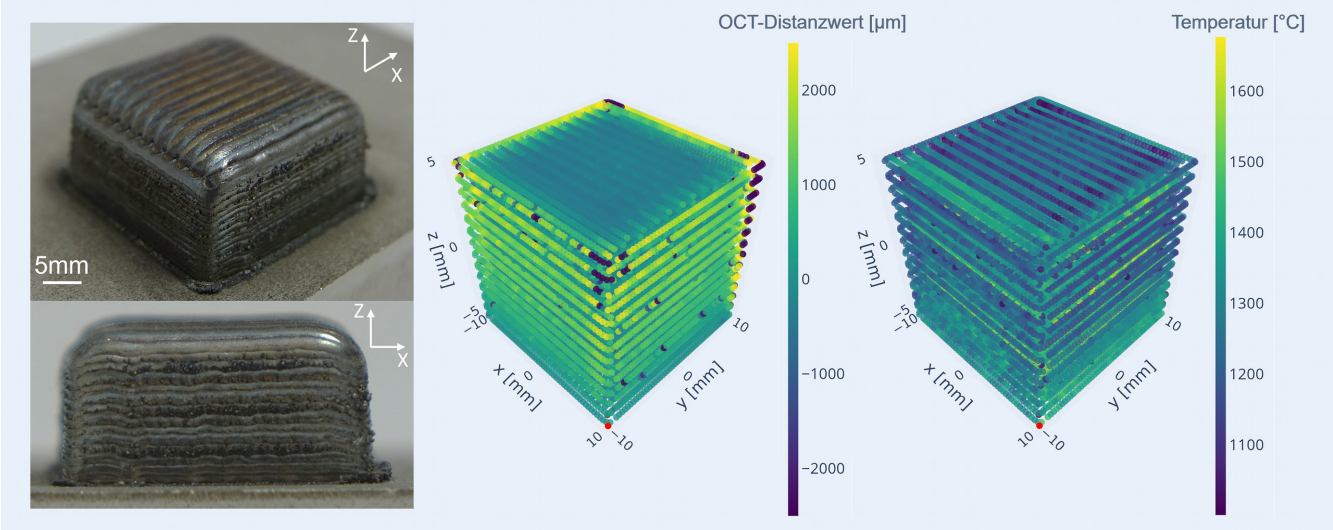

Bild 3. Links: Referenz-Quader. Mitte: Ortsaufgelöste Pyrometer-Temperatur. Rechts: Ortsaufgelöster OCT-Distanzwert (Es gilt Soll-Arbeitsabstand = Nullhöhe, positive Werte entsprechen einer Vergrößerung des Arbeitsabstandes). *Foto: Fraunhofer ILT / Grafik: Point 8 GmbH*

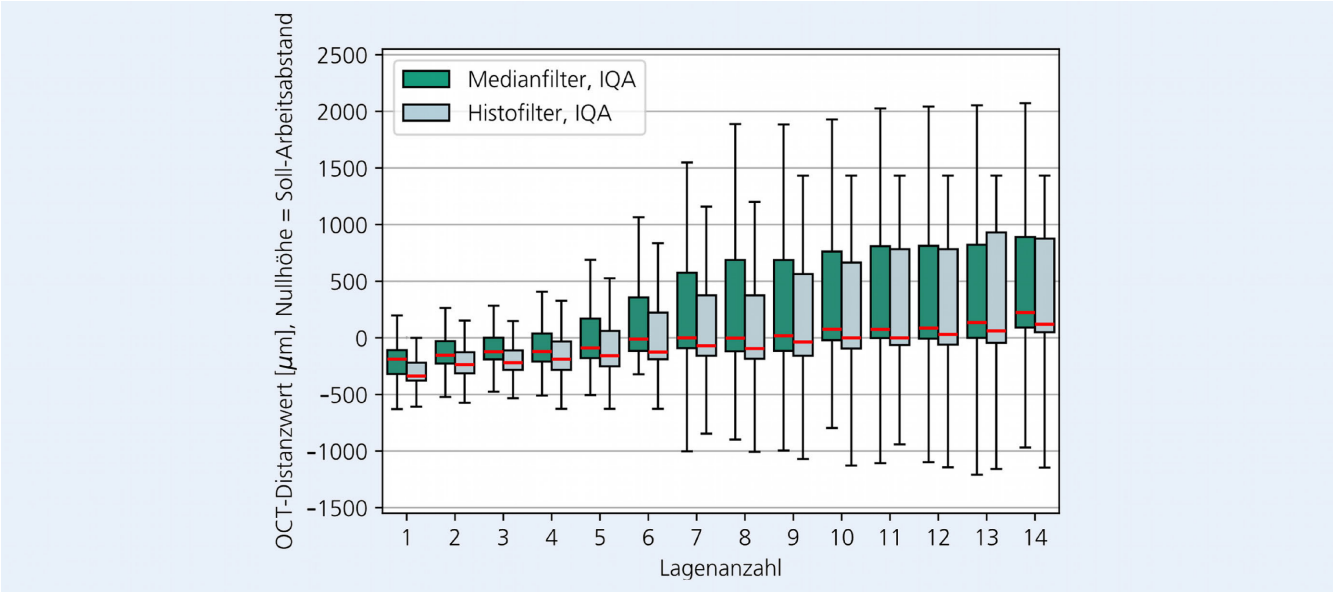

Bild 4. Gemessener OCT-Distanzwert über die Anzahl aufgebauter Lagen. *Grafik: Fraunhofer ILT*

abgeflachten Aufbau bedingt, der akkumuliert über die aufgetragenen Schichten in einem Abrunden der Kanten resultiert. Die durchschnittliche Abweichung von der Soll-Höhe (Eingestellte z-Zustellung multipliziert mit der Anzahl an Lagen) beträgt innerhalb der Versuchsreihe gemessen an der maximalen Probenhöhe weniger als 0,3 mm.

4.1 Messdaten des SD-OCT Sensors

In Bild 3 ist links der Messwert des OCT-Sensors über die Aufbauhöhe dargestellt. Zu erkennen ist ein erhöhter Messwert in der Konturfahrt der oberen Lagen, was einem Anstieg des Abstands zwischen Bauteil und Düse („Prozess-Standoff") entspricht. Messwerte, die den definierten Messbereich überschreiten, werden dem Minimalwert zugeordnet, was sporadisch in den Ecken des Quaders auftritt. Während in der Mitte der Probe eine geringe Varianz des OCT-Distanzwerts vorliegt, steigt dieser sichtbar in den Randbereichen an. Durch dieses Abbild des Prozess-Standoffs kann die Form der Proben mit einer hohen Auflösung mit Hilfe des OCT-Distanzwerts erfasst werden.

Ähnliche Effekte werden sichtbar, wenn der OCT-Distanzwert über die aufgebauten Lagen eines Quaders mithilfe eines Boxplots aufgetragen wird (vgl. **Bild 4**). Dabei ist zu beachten, dass das Auftragen einer Schweißspur zu einem negativen Arbeitsabstand führt. Es ist zu erkennen, dass mit steigender Lagenanzahl der Arbeitsabstand bezogen auf den Median um bis zu 441 µm steigt, während simultan ein deutlicher Anstieg des Interquartilsabstandes (IQA) sowie der Spannweite der Messergebnisse vorliegt. Aus diesem Anstieg resultiert eine Zunahme der Instabilität des Arbeitsabstands innerhalb einer Ebene, was direkt mit der Prozessstabilität korreliert. Unter Berücksichtigung der durchschnittlichen Höhenabweichung liefert der OCT-Messwert damit eine ausreichend gute Näherung, um den Prozess-Standoff sowie geometriebezogene Prozessabweichungen sowohl qualitativ als auch

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2025-05-42, am 30.05.2025, 09:40:24
Open Access – (cc) BY – https://elibrary.vdi-verlag.de/de/agb

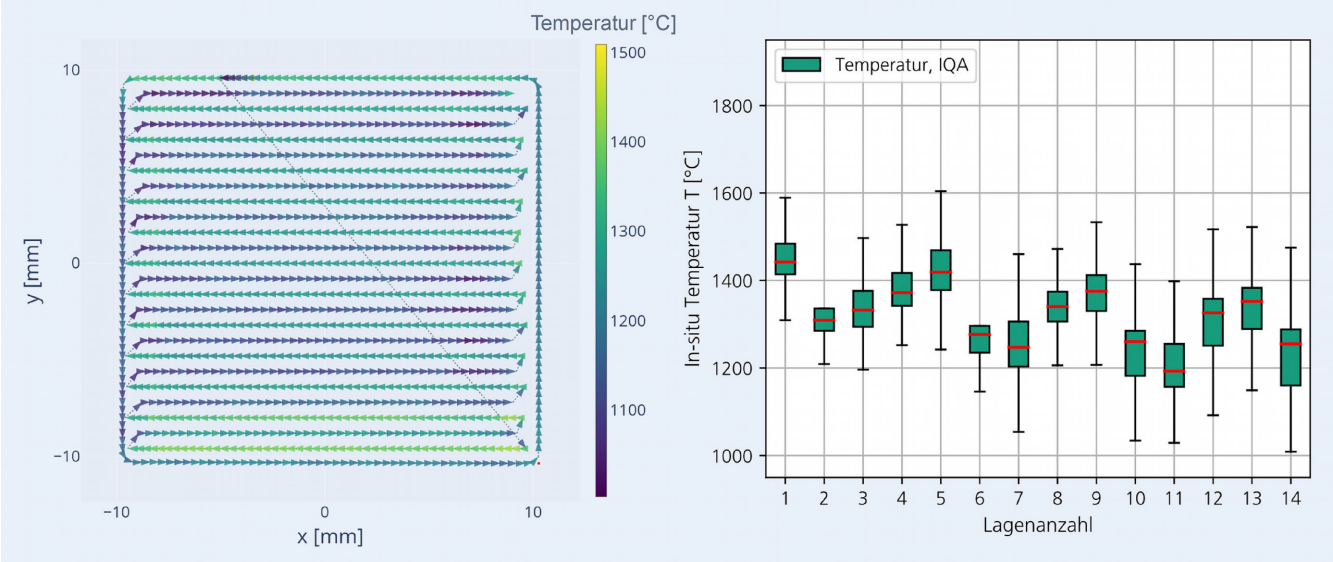

Bild 5. Auswertung der Messung des Quotientenpyrometers. Links: Lage 14 einer Referenzprobe. Rechts: Auswertung des Quotientenpyrometers über die aufgetragenen Schichten. *Grafik: Fraunhofer ILT / Point 8 GmbH*

quantitativ bewerten zu können. Eine Ermittlung der minimal detektierbaren Abweichungen der Höhe wird im Rahmen der Studie nicht durchgeführt.

4.2 Messdaten des Quotientenpyrometers

Die Ergebnisse der Pyrometer-Messung sind in Bild 3 rechts dargestellt. Es ergibt sich besonders in den oberen Lagen eine homogenere Verteilung der Schmelzbadtemperatur als bei den OCT-Distanzwerten. Dies wird durch einen kleineren Interquartilsabstand bestätigt, wenn die Temperatur über die aufgebauten Schichten aufgetragen wird. (vgl. **Bild 5** rechts). Auffällig ist jedoch, dass die gemessene Temperatur der Konturfahrt in den oberen Lagen abnimmt, während eine kontinuierliche Erwärmung des Bauteils zu erwarten ist. Im direkten Vergleich mit dem OCT-Distanzwert wird erkennbar, dass das Pyrometer infolge einer Abweichung des Prozess-Standoffs einen fehlerhaften Messwert generiert. Die Reduktion der Querschnittsfläche des Quaders führt dazu, dass das Pyrometer Bereiche bereits abgekühlter Schichten erfasst. Dieser Effekt wird durch den abweichenden Prozess-Standoff und den damit einhergehenden vergrößerten Messfleck verstärkt. Eine rein zeitlich aufgelöste Betrachtung des Pyrometer-Werts oder eine unimodale Prozessüberwachung hätte zu einer fehlerhaften Interpretation des Signals führen können. Im direkten Vergleich mit den OCT-Messdaten ist zusätzlich eine deutlich geringere Sensitivität gegenüber Geometrieabweichungen wahrnehmbar.

In Bild 5 sind links die Messungen des Quotientenpyrometers eines Referenzwürfels für Lage 14 dargestellt. Bei genauerer Betrachtung der Einzelspuren ist erkennbar, dass aus einem Verfahrweg des Roboters entlang der negativen X und Y-Richtung eine höhere Temperatur resultiert als aus den jeweils entgegengesetzten Raumrichtungen. Über alle Lagen der Proben zeigt sich zusätzlich ein periodisches Verhalten der Pyrometermessung, das sich jede vierte Lage wiederholt (vgl. Bild 5 rechts). Unter Berücksichtigung einer Schichtverdrehung von 90° nach jeder Lage zeigt sich erneut ein richtungsabhängiger Zusammenhang. Dies kann verschiedene Ursachen haben, wie etwa einen in XY-Richtung verschobenen Messfleck des Pyrometers zum Laserstrahl oder einer fehlerhaft eingestellten Düse, und bedarf weiterer Datenanalysen.

4.3 Messdaten der CMOS-Kamera

Ähnliche Effekte sind in den Aufnahmen der CMOS-Kamera sichtbar. In **Bild 6** ist neben einem exemplarischen Bild eines Schmelzbades die Auswertung der segmentierten Features der Bilder über die Konturfahrt der Proben dargestellt. Das Aufheizen der Probe in den unteren Lagen macht sich durch größere Werte des „Area_normalized“ Features bemerkbar. Das Abrunden der oberen Kanten bedingt entgegen der erwarteten Erwärmung einen Abfall des „Area_normalized“ Werts. Diese Effekte sind nicht direkt über den Wert „Sum_intensity“ abbildbar. Der Start- und Endpunkt der Konturfahrt (hintere rechte Probenseite in Bild 6) äußert sich durch deutlich niedrige Werte für beide Features. Gleiches gilt für detektierbare Richtungsabhängigkeiten, welche sich beispielsweise durch erhöhte Werte an der vorderen linken Probenseite in **Bild** 7 rechts äußern und ebenfalls ein über die Lagen periodisches Verhalten aufweisen. Besonders deutlich wird das Verhalten in den Randbereichen, was aus den Messwerten der Konturfahrt hervorgeht, wohingegen die inneren Bahnen eine homogenere Verteilung beider Features aufweisen. In Anlehnung an die Daten des Quotientenpyrometers zeigt sich auch bei den Werten der CMOS-Bildanalyse eine geringere Sensitivität gegenüber Geometrieabweichungen im Vergleich zu den OCT-Distanzwerten.

4.4 Überlagerung von Prozessdaten und CT-Aufnahmen

Die Auswertung und Korrelation der verschiedenen Datenquellen als Basis für die automatisierte Auswertung und das Training sowie die Anwendung von KI-Modellen profitiert von größtmöglicher Präzision bei der ortsaufgelösten Zusammenführung der verschiedenen Datensätze. Im Rahmen des Projektes wurden dabei verschiedene Ansätze untersucht. Als erfolgreich für diese Zwecke hat sich die Implementierung eines konfigurierbaren und

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2025-05-42, am 30.05.2025, 09:40:24
Open Access – (cc) BY – https://elibrary.vdi-verlag.de/de/agb

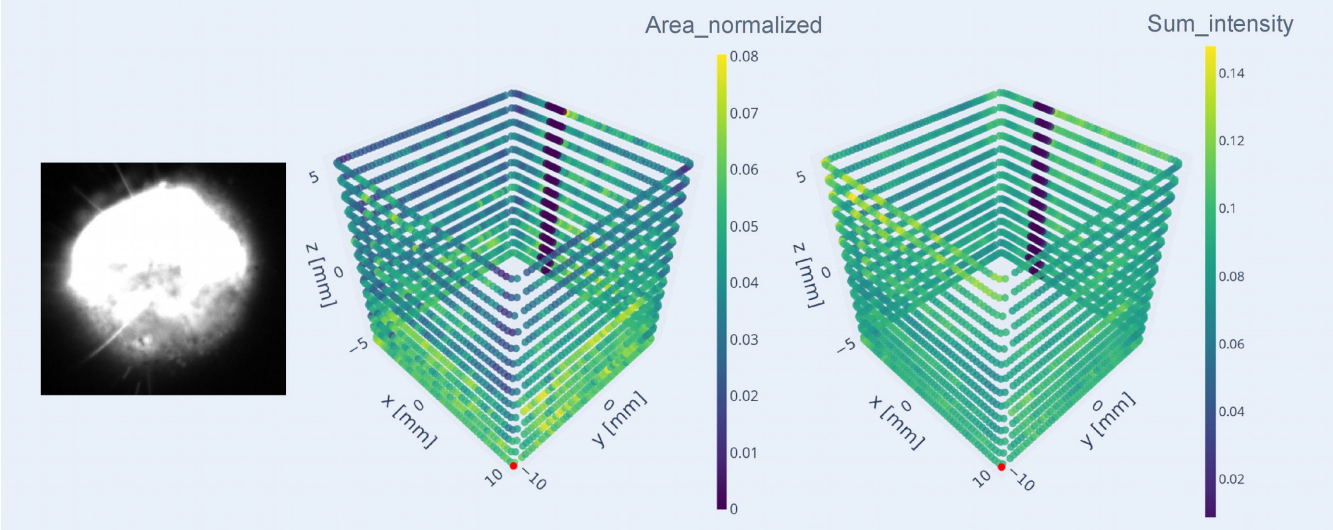

Bild 6. Links: Ortsaufgelöster „Area_normalized"-Wert der Konturfahrt. Mitte: Exemplarisches Bild eines Schmelzbades. Rechts: Ortsaufgelöster „Sum_intensity"-Wert der Konturfahrt. *Grafik: Fraunhofer ILT / Point 8 GmbH*

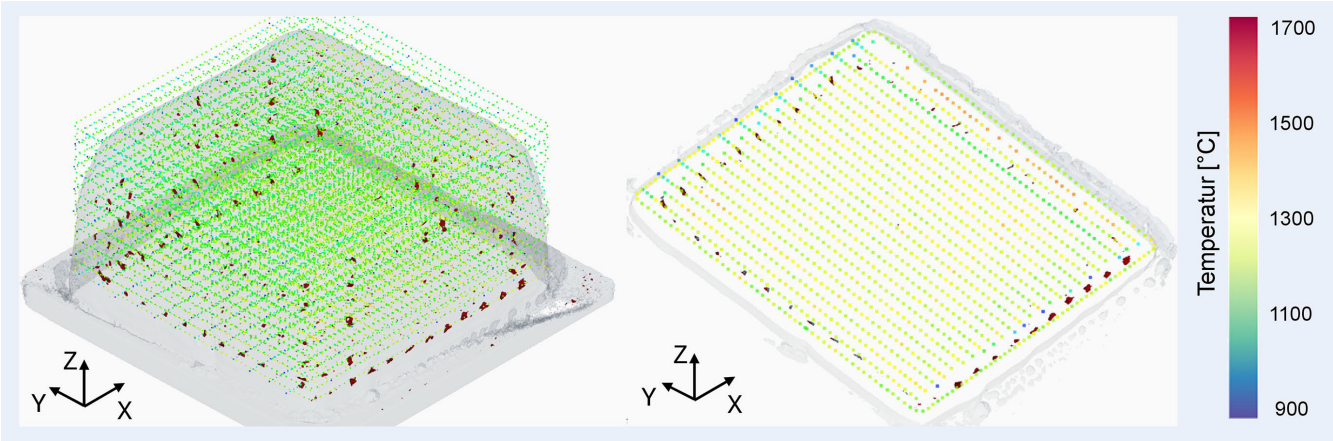

Bild 7. Überlagerung der Pyrometer-Prozessdaten mit CT-Defektmasken. Links: Gesamte Schweißprobe. Rechts: Messwerte der Lage 1. Defekte als rote Volumina dargestellt. *Grafik: BCT GmbH*

modularen Konzeptes erwiesen. Basierend auf der Gesamt-Rahmensoftware erfolgt zunächst eine homogene Zusammenführung der anlagenseitig erfassbaren Datensätze, wie der Prozessparameter, der Prozess-Bahnplanung sowie der anlagenintegrierten geometrischen Vermessung. Dabei erfolgt eine Kalibrierung des in der Anlage verbauten Geometrie-Scanners mit integrierten Kalibrierungs-Routinen der Rahmensoftware. Dabei konnte eine Wiederholbarkeit der Kalibrierung von unter 100 µm demonstriert werden.

Basierend auf diesem kalibrierten Sensor erfolgt die Vermessung der Bauteile vor Überführung zum CT-Scan im homogenen Koordinatensystem, in welchem in der Rahmensoftware auch die Prozessdatenerfassung sowie die Bahnplanung erfolgen. Durch Import der Resultate des CT-Scans in das dazugehörige abgespeicherte Projekt mit digitalem Prozess-Zwilling kann die modulare Ausrichtung zur automatisierten Fein-Einmessung zwischen CT-Scan und Geometrie der Probe aus der Vermessung zum Zeitpunkt der Anfertigung automatisiert ausgeführt werden.

Die Umsetzung mit selektiven Ausrichtungspunkten ist dabei von großer Bedeutung, da aufgrund der hohen Dichte und resultierenden Effekten in der CT-Vermessung nicht alle Flächen der Probe für die Ausrichtung geeignet sind (vgl. **Bild 8**: Abweichung auf der Oberseite der Probe im CT-Scan).

Das Residuum der Ausrichtung über die vorgefilterten Ausrichtungs-Punkte (zum Beispiel gefiltert nach Ausreißern beispielsweise aufgrund von inhomogenen Scandaten im 3D-Scan) wird dabei automatisch ausgewertet, wobei die Ausrichtung mit Restabweichungen im Mittelwert unter 100 µm erreicht wird. In **Bild 9** sind die Residuen der Ausrichtung der aufgeschweißten Proben dargestellt, wobei alle Ausrichtungspunkte mit einer Abweichung von mehr als 2 mm als Ausreißer bewertet werden und nicht in die Berechnung der Residuen einfließen.

Durch die exakte Ausrichtung können die CT-Daten mit den Prozessdaten überlagert werden und es können direkte Rückschlüsse auf den Prozess gezogen werden. In Bild 7 sind exemplarisch die ortsaufgelösten Messwerte des Quotientenpyrometers mit den überlagerten CT-Defektmasken dargestellt. Unter Betrachtung der ersten aufgeschweißten Lage ist eine Korrelation mit der Defektbildung anzunehmen. In Bereichen mit gemessenen Temperaturwerten < 1100 °C, die gehäuft in den Randbereichen der Schicht vorliegen, kommt es zu einer vermehrten Ausbildung von Defekten. Dieser Zusammenhang ist mit einer steigenden

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2025-05-42, am 30.05.2025, 09:40:24
Open Access – (cc) BY – https://elibrary.vdi-verlag.de/de/agb

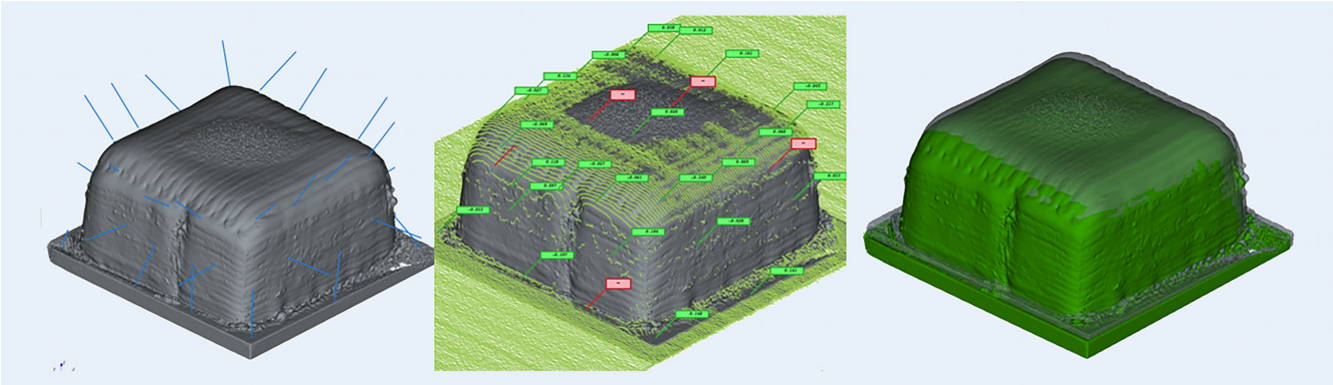

Bild 8. Ausrichtung des CT-Scans (grau, links) gegen die Punktewolke aus der maschinenintegrierten Vermessung (grün, mitte). Rechts: CT-Scan vor und nach Ausrichtung (transparent). *Grafik: BCT GmbH*

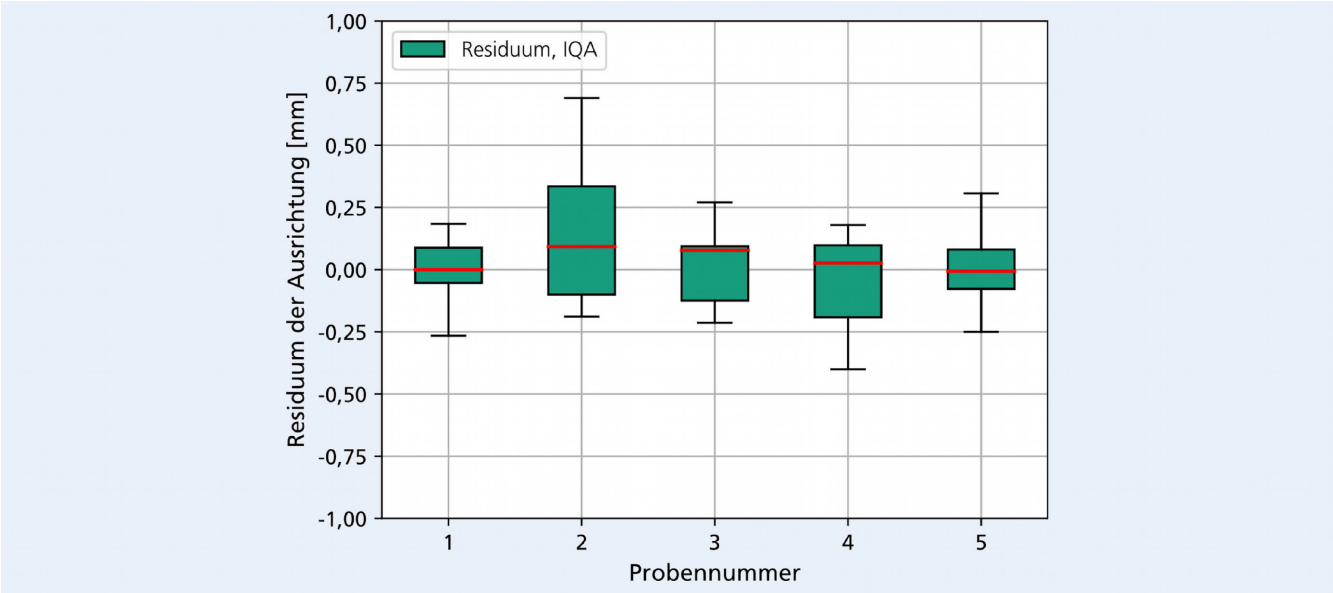

Bild 9. Residuen der Ausrichtung über gefilterte Ausrichtungspunkte. *Grafik: Fraunhofer ILT*

Lagenzahl nicht mehr sichtbar, da eine Erwärmung des Bauteils die Defektbildung vermindert.

Die Analyse der Ausbildung von Defekten kann somit bedeutend vereinfacht werden, bietet jedoch auch Potenzial für tiefergehende Analysen mit hochaufgelösten Daten. Aufbauend darauf könnte per Maschinellem Lernen ausgewertet werden, durch welche Prozesssignaturen sporadisch verteilte Defekte im Volumen detektiert werden können.

5 Fazit und Ausblick

In der vorgestellten Studie wurde ein multimodaler Ansatz zur sensorbasierten Prozessüberwachung beim Laserauftragschweißen entwickelt und implementiert, um die Qualität und Effizienz von geschweißten Bauteilen zu steigern. Hierfür wurde ein 6-Achs-Industrieroboter mit berührungsloser Sensorik in Form von Quotientenpyrometer, CMOS-Kamera, und SD-OCT-Sensor sowie einer Datenerfassungsschnittstelle ausgestattet. Die Geometrie vor und nach dem Schweißprozess wurde mit Hilfe eines anlagenintegrierten Laserlinienscanners erfasst und die Prozessdaten durch die Synchronisation mit dem TCP des Roboters ortsaufgelöst erfasst. Die Geometrie sowie die Prozessdaten wurden erstmals mit Defektmasken aus computertomographischen Aufnahmen überlagert, sodass prozessinduzierte, ortsbezogene Defekte direkt mit Sensorsignalen korreliert werden können.

Durch die Implementierung der Datenerfassungs-Pipeline wurde experimentell nachgewiesen, dass geometriebezogene Prozessabweichungen multimodal durch verschiedene Sensoren mit unterschiedlichen Sensitivitäten erfasst werden können. Ein entscheidender Vorteil liegt dabei in der robusten Beschaffenheit des Systems, das eine Fehlinterpretation von Sensorsignalen ausschließt. Die hochpräzise Überlagerung der Prozessdaten mit den CT-Defektmasken, die automatisiert mittels Best-Fit Ausrichtung durchgeführt wird, konnte am Anwendungsbeispiel auf durchschnittliche Residuen von unter 100 µm realisiert werden. Durch das Zusammenführen aller Schnittstellen in der OpenArms Softwareumgebung konnte somit ein automatisiertes Konzept zur Generierung von ortsaufgelösten, defektkorrelierten Prozessdaten entwickelt werden.

Vor dem Hintergrund einer zunehmenden Anzahl an Anwendungen der künstlichen Intelligenz (KI) kann die Effizienz und Qualität der Datengenerierung um ein Vielfaches gesteigert werden und die Erfassung automatisch prozessbegleitend erfolgen. Aufbauend darauf können Modelle zur Früherkennung und in-si-

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2025-05-42, am 30.05.2025, 09:40:24
Open Access – (cc) BY – https://elibrary.vdi-verlag.de/de/agb

tu Kompensation von Prozessanomalien im Laserauftragschweißen entwickelt werden, die die Bauteilqualität maßgeblich steigern. Dies könnte sowohl anhand einer Offline-KI, basierend auf CT-Daten, als auch unter Verwendung einer Online-KI mithilfe eines Edge Devices realisiert werden. Eine Entwicklung und Anwendung derartiger Modelle erfolgt anhand industrieller Demonstratoren im weiteren Verlaufe des hier vorgestellten Projekts.

FÖRDERHINWEIS

Dieses Forschungs- und Entwicklungsprojekt wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) im Programm „Zukunft der Wertschöpfung – Forschung zu Produktion, Dienstleistung und Arbeit“ (Förderkennzeichen 02P20A082) gefördert und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

DANKSAGUNG

Die Autoren bedanken sich bei allen Projektpartnern des „ProSLAM“ Projekts für die herausragende Zusammenarbeit und die exzellenten Ergebnisse: BCT Steuerungs- und DV-Systeme GmbH, Point 8 GmbH, Diondo GmbH, Resolto GmbH, Precitec GmbH & Co. KG., Fraunhofer ILT.

LITERATUR

[1] Poprawe, R.; Häfner, C.; Wester, R.: Tailored Light 2. Cham: Springer International Publishing 2024

[2] Ahn, D.-G.: Directed Energy Deposition (DED) Process: State of the Art. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology 8 (2021) 2, S. 703–742

[3] Bernhard, R.; Neef, P.; Wiche, H.; Wesling, V.; Hoff, C.; Hermsdorf, J.; Kaierle, S.: Entwicklung einer intelligenten Prozessüberwachung und Regelung zum Laserauftragschweißen von Multimaterial-Verbindungen. Düren: Shaker Verlag 2021

[4] Song, L.; Bagavath-Singh, V.; Dutta, B.; Mazumder, J.: Control of melt pool temperature and deposition height during direct metal deposition process. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 58 (2012) 1-4, S. 247–256

[5] He, W., Shi, W., Li, J. u. Xie, H.: In-situ monitoring and deformation characterization by optical techniques; part I: Laser-aided direct metal deposition for additive manufacturing. Optics and Lasers in Engineering 122 (2019), S. 74–88

[6] Gunasegaram, D. R.; Barnard, A. S.; Matthews, M. J.; Jared, B. H.; Andreaco, A. M.; Bartsch, K; Murphy, A. B.: Machine learning-assisted in-situ adaptive strategies for the control of defects and anomalies in metal additive manufacturing. Additive Manufacturing 81 (2024), S. 104013

[7] Bi, G.: Identifizierung und Qualifizierung von prozessrelevanten Kenngrößen zur Überwachung und Regelung beim Laserstrahlauftragschweißen. Berichte aus der Lasertechnik. Aachen: Shaker 2004

[8] Welzel, J.; Schuh, S.: Optische Kohärenztomographie bei Pathologien der Haut. Der Ophthalmologe : Zeitschrift der Deutschen Ophthalmologischen Gesellschaft 115 (2018) 6, S. 524–527

[9] Drexler, W.; Fujimoto, J. G.: Optical Coherence Tomography. Cham: Springer International Publishing 2015

[10] Kogel-Hollacher M., Strebel M., Staudenmaier C., Schneider H., Regulin D.: OCT Sensor for Layer Height Control in DED using SIEMENS Machine Controller. 11th CIRP Conference on Photonic Technologies 2020

[11] Kittel, J.; Wendt, F., Hoelters, S., Gasser, A. u. Hackel, M.: Approach for advanced working distance monitoring and control capability in laser metal deposition processing for additive manufacturing. Journal of Laser Applications 35 (2023) 2

[12] Smoqi, Z.; Bevans, B. D.; Gaikwad, A.; Craig, J.; Abul-Haj, A.; Roeder, B.; Macy, B.; Shield, J. E.; Rao, P.: Closed-loop control of meltpool temperature in directed energy deposition. Materials & Design 215 (2022) 110508

[13] Freeman, F.; Chechik, L.; Thomas, B.; Todd, I.: Calibrated closed-loop control to reduce the effect of geometry on mechanical behaviour in directed energy deposition. Journal of Materials Processing Technology 311 (2023) 117823

[14] Ünal-Saewe, T.: Ortsaufgelöste Prozessüberwachung für die Additive Fertigung mittels laserbasierter Directed Energy Deposition. Dissertation. Ergebnisse aus der Lasertechnik. Aachen 2022

[15] Neumann, G.; Bremer, J.: ProLMD - Prozess und Systemtechnik zur Hybrid-Fertigung großer Bauteile mit dem Laser-Material-Deposition-Verfahren. Aachen: Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT 2021

[16] Bremer, J.: Verwendung von Industrierobotern für das Laserauftragschweißen. RWTH Aachen University 2023

Cedric Hauschopp, M.Sc.
Tel. +49 241/ 8906 269
cedric.hauschopp@ilt.fraunhofer.de
Foto: Fraunhofer ILT

Simon Dicks, M.Sc.
simon.dicks@ilt.fraunhofer.de

Richard Kraft, B.Sc.
richard.kraft@ilt.fraunhofer.de

Fraunhofer Institut für Lasertechnik ILT
Steinbachstr. 15, 52074 Aachen
www.ilt.fraunhofer.de

Dr.-Ing. Jan Bremer
j.bremer@bct-online.de

BCT Steuerungs- und DV-Systeme GmbH
Carlo-Schmid-Allee 3, 44263 Dortmund

Daniel Wall, M.Sc.
dwall@point-8.de

Point 8 GmbH
Rheinlanddamm 201, 44139 Dortmund

Dr. Nick Brierley
nick.brierley@diondo.com

Diondo GmbH
Ruhrallee 14, 45525 Hattingen

Prof. Dr. rer. nat. Constantin Häfner
constantin.haefner@ilt.fraunhofer.de

Lehrstuhl für Lasertechnik LLT der RWTH Aachen
Steinbachstr. 15, 52074 Aachen

LIZENZ

Dieser Fachaufsatz steht unter der Lizenz Creative Commons Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2025-05-42, am 30.05.2025, 09:40:24
Open Access – (cc) BY – https://elibrary.vdi-verlag.de/de/agb