

1 Einleitung und Motivation

Additive Fertigungsprozesse (engl: Additive Manufacturing, AM) gelten als wichtige Bausteine zur Deckung zukünftiger Bedarfe hinsichtlich flexibler und ökonomischer Fertigung. Den dynamischen Anforderungen hinsichtlich Designs, flexiblen Werkstoffeigenschaften und Funktionen begegnet AM durch lagenweisen Aufbau bei gleichzeitig präziser Steuerungs- und Überwachungsmöglichkeit. Trotz des großen Potentials wird in Umfragen im Jahre 2020 die Beschleunigung der Produktentwicklung von 41% der Befragten als ein Hauptziel für die Etablierung von AM-Prozessen aufgeführt. Hierbei ist die aktuell erfahrungs- und Trial-and-Error-basierte, iterative Entwicklung von Prozessen, die zusätzlich anwendungsabhängig wiederholt werden muss, das größte Defizit. Eine Steigerung der Technologiezuverlässigkeit gilt als eine der Haupthandlungspunkte für das Wachstum von AM. So werden Prozesse heute vor allem auf Basis zeit- und kostenintensiver zerstörender Untersuchungen anhand weniger objektiver Kriterien wie riss- und porenfreier Volumina qualifiziert. Geschwindigkeit und Erfolg der Prozessentwicklung hängen daher stark von Know-how und Erfahrung der Entwickler ab. Für das gefertigte Produkt besteht zumeist trotzdem keine Garantie für den defektfreien Aufbau. Als Integrationshemmnis werden im Jahr 2020 daher von 51% der Befragten vor allem mangelndes Prozesswissen angegeben. [1]

Unter den AM-Verfahren hebt sich das laserbasierte Directed Energy Deposition (DED, dt. Laserauftragschweißen) aufgrund seines vielseitigen Anwendungspotentials besonders hervor. DED eignet sich neben der additiven Herstellung von Komponenten als Reparatur- und Beschichtungsverfahren sowie zur gezielten Funktionalisierung vorgefertigter Basisbauteile. Breite Anwendung finden DED-Prozesse insbesondere im Turbomaschinenbau, bspw. in der Reparatur von Turbinenschaufelspitzen, der Individualisierung von Triebwerksgehäusen oder der additiven Fertigung von BLISK-Turbinenschaufeln auf Schmiederohlingen [2–4]. Durch die Inkonsistenz hinsichtlich Prozessstabilität, Wiederholbarkeit und Maschinenübertragbarkeit werden jedoch kostensteigernde Herausforderungen in der Qualifizierung der additiv gefertigten Luftfahrt-Komponenten dargestellt. So betragen nach [5, S. 46] die Aufwände der Qualitätssicherung ca. 30% der Wertschöpfung für ein additiv serienfertigtes Triebwerksbauteil.

In diesem Spannungsfeld bietet vor allem die Prozessüberwachung das Potential, die Transparenz der AM-Prozesse hinsichtlich der Sensitivität gegenüber Prozessunregelmäßigkeiten und auftretender Phänomene zu steigern und das Vertrauen in AM zu erhöhen, in dem bspw. Risikobereiche identifiziert werden, die eine hochauflösende zerstörungsfreie Prüfung erfordern [6]. In der bisherigen Forschung und Entwicklung der Prozessüberwachung der metallbasierten AM-

Verfahren steht die Beobachtung des Schmelzbads als Prozessüberwachungsgröße im Fokus.

Um während des schichtweisen Aufbaus von Volumenkörpern die Lokalisierbarkeit von Prozessanomalien zu ermöglichen und ex-situ detektierte Bauteileigenschaften zu in-situ erfassten Sensorsignalen bei komplexen Bauteilgeometrien zuzuordnen, werden die Prozessüberwachungsdaten vor allem örtlich aufgelöst für einzelne Bauteilquerschnitte benötigt. Im Stand der Technik der Prozessüberwachung des DED können hingegen überwiegend Arbeiten zur zeitaufgelösten Erfassung von Messdaten identifiziert werden. Dadurch werden die Anwendungen auf vereinfachte und für AM beschränkt repräsentative Geometrien wie Einzelspuren und Stege beschränkt. Eine allgemein und geometrieunabhängig anwendbare Methodik zur Korrelation von zeit- und orts aufgelösten Messdaten ist in der Literatur für das DED nicht dokumentiert.

Neben der orts aufgelösten Rückverfolgbarkeit von Prozessüberwachungsdaten sind neue Methoden der Datenauswertung erforderlich, um auch kleinste Prozessabweichungen reliabel zu detektieren. Insbesondere durch maschinelles Lernen wird aufgrund der Fähigkeit zur Mustererkennung in hochdimensionalen Daten die Lösung einer Vielzahl von komplexen Herausforderungen ermöglicht [7]. Neuartige Modelle des maschinellen Lernens wie künstliche neuronale Netze werden durch die Möglichkeit der Abbildung komplexer Zusammenhänge charakterisiert. Demnach wird in der Verarbeitung der mittels Sensorik erfassten thermischen Schmelzbademission durch maschinelles Lernen ein Potenzial zur Vergrößerung der Wirtschaftlichkeit des DED-Verfahrens identifiziert [8, 9].

Im Rahmen dieser Arbeit werden daher Potentiale der orts aufgelösten Prozessüberwachung untersucht. Dafür wird die Entwicklung einer Softwarelösung vorgestellt, durch die die Erfassung der Prozessüberwachungsdaten sowie der Maschinensteuerung realisiert wird. Für die räumliche Lokalisierung der Messpunkte erfolgt die Synchronisation mit den Tool Center Point-Koordinaten der Werkzeugmaschine. Als Prozessüberwachungssensoren werden, koaxial in den DED-Bearbeitungskopf integriert, ein Pyrometer und eine CMOS-Kamera eingesetzt. Die Untersuchungen werden auf die Erkennung von Prozessabweichungen durch die verwendeten Sensoren sowie neuartige Datenanalysemethoden fokussiert. Die beiden Sensoren werden hinsichtlich der Sensitivität gegenüber systematischen Prozessparameteränderungen für die additive Fertigung untersucht und Methoden des maschinellen Lernens für die Mustererkennung in den Messdaten appliziert. Daran angeknüpft wird das Datenerfassungs- und Analysekonzept anhand industrieller Demonstratoren aus Turbomaschinenbau demonstriert, um die geometrieunabhängige Nutzbarkeit zu zeigen und einen Ansatz für die Anwendung von Qualitätssicherungsmethoden vorzustellen.