

ProSLAM

# INTEGRATION VON SENSORDATENERFASSUNG, DATENANALYSE UND KI-FUNKTIONALITÄT

## IN EIN MASCHINENAHES SOFTWAREKONZEPT ZUR ADAPTIVEN BEARBEITUNG

Dr. Jan Bremer (BCT), Dr. Markus Kogel-Hollacher (Precitec), Dr. Nick Brierley (diondo), Dr. Julian von der Ecken (Point8), Dr. Felix Bergunde (Resolto), Cedric Hauschopp (Fraunhofer ILT)

**Am Beispiel des Laserauftragschweißens als Prozess mit komplexer Interaktion von Prozessparametern, Anlagentechnik, Bahnplanung und Bauteileigenschaften soll das Potenzial für die Umsetzung einer softwaregestützten, anlagennahen Benutzerunterstützung mittels automatisierter Prozessdatenaufnahme und -analyse sowie KI-basierter Parameterauswahl und Defektvorhersage zur Beurteilung der erwartbaren Bauteilqualität demonstriert werden.**

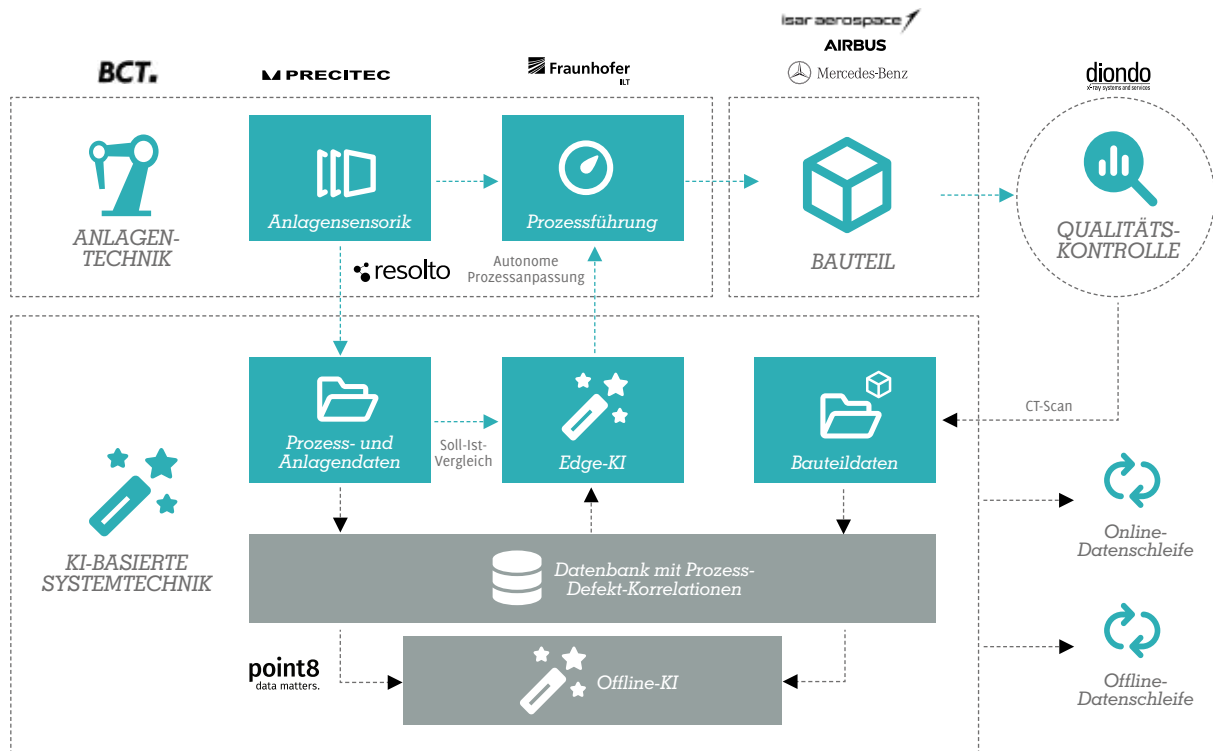
Das Gesamtziel des Forschungsvorhabens ProSLAM ist die Entwicklung einer KI-basierten, autonomen und lernenden Prozessplanung und -steuerung für additive Fertigungsverfahren, speziell das Laser Material Deposition (LMD) Verfahren. Dabei soll es vor allem um die Schaffung automatisierbarer Abläufe zur Erfassung relevanter Prozessdaten in hoher Qualität sowie Verfahren zum Training und Labeling von Prozessergebnissen auf Basis digitaler Abläufe zur dreidimensionalen Inspektion der resultierenden Bauteile mittels geometrischer Vermessung und CT-Analyse gehen.

Die Funktionalität dieser Systeme wird anhand industrieller Demonstratoren von Airbus, Mercedes Benz und Isar Aerospace validiert. Die übergeordneten Ziele des Projekts sind:

- Produktivitätssteigerung: Erhöhung der Gesamtproduktivität von LMD-basierten AM-Prozessen durch eine umfassende Prozessüberwachung und den Einsatz von KI-Methoden.
- Beschleunigung der Prozessentwicklung: Verkürzung der Entwicklungszeit durch daten- und KI-basierte Vorhersagen von Materialeigenschaften
- Verbesserte Materialausnutzung: Optimierung der Materialnutzung, Reduzierung von Ausschuss und Erhöhung der Anlagenverfügbarkeit
- Fehlervermeidung: Vorhersage und Vermeidung potenzieller Fehler (Risse, Anbindungsfehler und Poren) während des Prozesses durch KI-basierte Prozessführung

Das auf einer KI-gestützten Prozesssteuerung basierende Vorhaben in ProSLAM umfasst die Entwicklung und Validierung einer Steuerung, die auf umfangreichen Prozessüberwachungsdaten basiert. Diese Daten werden während des Prozesses, lagenweise intermittierend und nach dem Prozess erfasst. Zwei interagierende KIs werden entwickelt:

- Offline-KI: Korrelation von Prozessmessdaten mit Bauteil- und Werkstoffeigenschaften, basierend auf online und nach dem Prozess erhobenen Überwachungsdaten
- Online Edge-KI: Nutzung der Ergebnisse der Offline-KI und der online erfassten Prozessüberwachungsdaten zur lagenweisen Anpassung des Prozesses für einen fehlerfreien Aufbau



## Erfassung prozessrelevanter Daten

Zur Erfassung von Datensätzen für die Entwicklung der prozessadaptiven KI wurde ein KUKA-Industrieroboter mit einem Datenerfassungssystem für LMD-Prozesse ausgestattet. Um mit der Sensorik auch koaxial zum Laserstrahl messen zu können, wurde eine neuartige Laserschweißoptik eingesetzt. Die Steuerung des Prozessablaufs der Roboteranlage sowie die Bahnprogrammierung, die In-situ-Geometriemessung der Bauteile und die Prozessdatenerfassung erfolgen dabei über ein integriertes anlagennahes Softwarekonzept.

Prozesse in der Lasermaterialbearbeitung haben gegenüber konkurrierenden Verfahren den Vorteil, dass sie vollständig berührungslos ablaufen. Zudem bedingt der Einsatz im Kontext der additiven Fertigung eine komplette Richtungsunabhängigkeit. Diese wesentlichen Randbedingungen waren die Grundlage für die Entwicklung des Laserbearbeitungskopfes im Projekt ProSLAM für die Precitec GmbH & Co. KG. In der Zusammenarbeit mit den Projektpartnern und Experten im Bereich der KI wurde ein Sensorkonzept erstellt, das ebenso berührungslos die wesentlichen

Messgrößen aus einem additiven Prozess extrahiert. In erster Hinsicht geht es um klassische Prozessparameter, wie Temperatur und Geometrie der Metallschmelze. Neu im Kontext der additiven Fertigung ist der Einsatz der OCT (Optische Kohärenztomographie) als Verfahren für die Messung der Spurrhöhe.

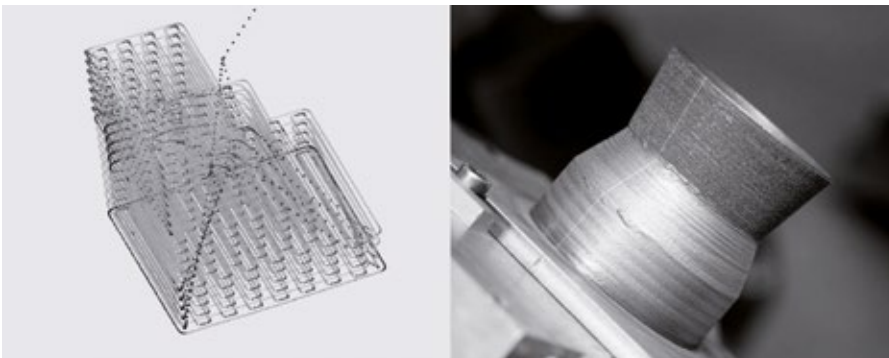
Die von der Firma Precitec entwickelte und bereitgestellte Lösung ist ein Bearbeitungskopf, der alle Sensorschnittstellen beinhaltet und alle generierten Daten an die übergeordnete Steuerung kommuniziert. Als Experte für Lasermaterialbearbeitungslösungen wurden die optomechanischen Anforderungen umgesetzt und in die Roboterzelle integriert.

Um berührungslose Messungen des Prozesses durchzuführen, wurde die Bearbeitungsoptik neben der OCT mit einer CMOS-Kamera, einem Pyrometer, einem Gasdurchflusssensor und einem Laserlinienscanner ausgestattet und die Sensorik seitens des Fraunhofer ILT auf den LMD-Prozess kalibriert. Durch die Verwendung eines Datenakquisitionssystems ist das synchronisierte Generieren von Daten zur Spur- und Schmelzbadgeometrie, Schmelzbadtemperatur und Bauteilgeometrie möglich.



Als Basis für die präzise, wiederholgenaue und benutzerfreundliche Durchführung des LMD-Prozesses ist die Einhaltung der geometrischen Grundparameter des Verfahrens von zentraler Bedeutung. So sollten der Arbeitsabstand sowie die Orientierung relativ zur Bauteiloberfläche möglichst konstant eingehalten werden. Die Programmierung der Schweißbahnen sollte dabei unter Berücksichtigung der realen Ist-Geometrie des Grundbauteils, Substrates oder letzten Stands des Druckfortschrittes erfolgen. Diese sogenannte adaptive Bahnplanung sowie die Durchführung der präzisen geometrischen Vermessung mittels anlagenintegrierter Laserlinienscanner-Technologie wird vom Projektpartner BCT Steuerungs- und DV-Systeme GmbH in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer ILT durchgeführt. Angepasste Kalibrierroutinen sowie diverse algorithmische Pipelines zur effizienten Verarbeitung der großen Datenmengen werden dabei im Rahmen des Projektes getestet, weiterentwickelt und validiert. Durch einen präzisen digitalen Zwilling der Anlagentechnik und Sensoren kann dabei ein geometrisch hochaufgelöster und akkurater digitaler Schatten des Bauteils in homogenen Koordinaten gemeinsam mit präzisen geometrischen Messwerten erzielt werden. Die Fusion der verschiedenen Anlagendaten, Sensorwerte sowie geometrischen Messwerte der verschiedenen Zustände des Bauteils und die Zusammenführung in eine gemeinsame benutzerfreundliche grafische Oberfläche ist Projektaufgabe der BCT Steuerungs- und DV-Systeme GmbH. Im Rahmen des

Projektes konnte die Entwicklung von Treibern zu geeigneten Sensoren direkt (z. B. Laserlinienscanner, Prozesskamera) und zu weiteren Sensoren über eine geeignete Datenerfassungseinheit erreicht werden. Die Sensoren werden dabei je nach Möglichkeit des individuellen Sensors zusammengeführt und mit den hochaufgelöst erfassten Anlagenpositionen fusioniert. So entsteht ein Datensatz mit bestmöglicher orts aufgelöster Qualität, der als Basis für die weiteren Arbeiten und gemeinsam mit externen Quellen wie der CT-Analyse und dem Training von KI-Modellen der Auswertung sowie der Prozessdiagnose dient. Die industrielle Computertomographie (CT) hat sich in den letzten Jahren zu einer wichtigen Prüftechnik zur zerstörungsfreien Bewertung der Qualität additiv gefertigter Metallbauteile entwickelt. Mit der CT können sowohl Fehler in Bauteilen, wie z. B. Poren, Risse und Anbindungsfehler, nachgewiesen, als auch eine Validierung der Bauteilgeometrie gegenüber der Konstruktion durchgeführt werden. Als Hersteller industrieller CT-Systeme verfügt die diondo GmbH über ein breites Spektrum hauseigener Anlagen, mit denen eine umfassende Charakterisierung der im Projekt gefertigten Testkörper und Bauteile, von der Mikrostruktur bis zur kompletten Bauteilgeometrie, durchgeführt wird. Zur automatisierten Auswertung der umfangreichen CT-Daten werden im Projekt unterschiedliche KI-basierte Methoden hinsichtlich ihrer Eignung erprobt und eingesetzt. Über intermittierende CT-Prüfungen im LMD-Prozess werden die Entstehung



Datenaufnahme und Beispiele: 3D-Pyrometerdaten aus LMD-Prozess and ProSLAM-Anlage (links), geometrische Vermessung LMD-Bauteil auf Roboteranlage (rechts)



und die Fortpflanzung von Fehlern nachverfolgt und darüber hinaus wichtige Informationen zur Prozessüberwachung gewonnen, die die Messdaten der Anlagensensorik komplementiert und validiert. Die CT-Datensätze werden dabei eingesetzt, um die gespeicherten Prozessdatensätze mit den detektierten Bauteildefekten ortsauflösend zu korrelieren.

### Bauteil- und Datenanalyse

Um CT-Untersuchungen unter vergleichbaren Bedingungen durchführen zu können, hat die diondo GmbH im Projekt ein Verfahren entwickelt, das eine automatische Positionierung der Bauteile unter optimalen Prüfbedingungen ermöglicht. Hierzu wurde ein digitaler Zwilling der CT-Anlage unter Einsatz umfangreicher Methoden der Röntgensimulation realisiert. Das Tool erlaubt darüber hinaus eine bestmögliche Parametrisierung der CT-Messung, angepasst an die Geometrie und den Werkstoff des Prüfkörpers, wodurch Zeit und Kosten eingespart werden. Mithilfe der additiven Fertigung werden häufig Bauteile mit komplexen Geometrien gefertigt, deren präzise Halterung innerhalb des CT-Systems die Anwender vor teilweise große Herausforderungen stellt. Die diondo GmbH hat im Projekt einen Algorithmus realisiert, der mit dem digitalen Zwilling Konstruktionsmodelle berechnet, auf deren Grundlage eine automatische Fertigung individueller Bauteilhalter mittels additiver Fertigung möglich ist. Auf diese Weise ist eine robuste und reproduzierbare Fixierung der Probe im CT möglich, die für den intermittierenden Transport der LMD-Bauteile zwischen der LMD- und der CT-Anlage projektrelevant ist.

KI-Methoden halten Einzug in die unterschiedlichsten industriellen Anwendungsbereiche. Es ist im Rahmen der adaptiven Prozesssteuerung das Ziel, KI-basierte Assistenzsysteme zu schaffen, die den Bediener unterstützen. Dabei hängt die methodische Auswahl der KI stark von der Art der Daten und der jeweiligen Problemstellung ab.

Die Point 8 GmbH ist etablierter Dienstleister für die Konzeption und Umsetzung von KI-Projekten im Maschinen- und Anlagenbau sowie in der produzierenden Industrie. Im Forschungsprojekt ProSLAM hat sie sich methodisch sehr breit mit den verschiedenen Datenströmen auseinandergesetzt, um die relevantesten und erfolgversprechendsten KI-Methoden für die Umsetzung zu identifizieren. Besonderes Augenmerk wird dabei auf die Datenqualität und die statistische Aussagekraft der Daten gelegt, um aus Experimenten für die Trainingsdaten eine fundierte und reproduzierbare Datenbasis zu schaffen.

In der Analyse und methodischen Auswahl stellt die Definition und das Vorhandensein des Labels eine große Herausforderung. Denn es muss mit den Prozessparametern korrelieren und für das Training der Offline-KI verwendet werden können. Mögliche Größen sind dabei Informationen aus CT-Scans über Defekte, wie z. B. Poren, Live-Informationen über den aktuellen Arbeitsabstand (vgl. OCT) und auffällige Strahleigenschaften (Kameradaten). Auch der Erfahrungswert des Domänenexperten zur aktuellen Prozessstabilität ist ein wichtiges Kriterium, um die Ergebnisse direkt mit möglichen Handlungsempfehlungen für die Prozessführung für die Online-KI anzureichern. Neben dem Testen verschiedener Zielgrößen findet auch ein detailliertes Feature-Engineering (im Besonderen für die Bilddaten) statt.

Gegenwärtig wird die Offline-KI im Hinblick auf verschiedene Fehlerfälle entwickelt, sodass die Ergebnisse schließlich an die Online-KI zur Live-Prozessüberwachung übergeben werden können.

### KI-Funktionalität

Ziel der Online-KI ist es, Abweichungen vom Normalzustand frühzeitig zu erkennen und durch ein Pausieren des Prozesses und/oder durch die Bereitstellung von Echtzeitinformationen und Handlungsempfehlungen für die/den Prozessexpertin/-experten den Prozess zu stabilisieren. Ein zentrales Element hierbei



ist das verwendete Edge Device (IPC), das CUDA- und GPU-fähig ist, um die Verarbeitung großer Datenströme zu parallelisieren und in nahezu Echtzeit zu ermöglichen. Hierdurch sollen zusätzliche Prozessunterbrechungen vermieden werden.

In Absprache mit BCT wurden Schnittstellen für die Datenübergabe definiert und beschlossen, das MQTT-Protokoll mit einer Protobuf-Serialisierung zu verwenden, um eine zuverlässige und schnelle Datenübertragung zu gewährleisten. MQTT bietet im LMD-Prozess eine effiziente Datenübertragung mit geringer Latenz, flexible Integration durch das Publish/Subscribe-Modell, hohe Zuverlässigkeit dank robustem Fehlermanagement und plattformunabhängige Interoperabilität. Protobuf ermöglicht eine effiziente und hochleistungsfähige Datenserialisierung, die kompakte und schnell verarbeitbare Datenformate erzeugt. Mit Protobuf können auch größere Datenpakete effizient übermittelt und gespeichert werden. Protobuf ist zudem plattformunabhängig und ermöglicht durch die stark typisierte Struktur eine flexible Integration und robuste Datenübertragung.

Die integrierten Sensoren umfassen verschiedene Datentypen, die es performant zu verarbeiten gilt. Insbesondere die CMOS-Bilder des Schmelzbades mit einer Auflösung von ca. 500 x 500 Pixeln und einer Frequenz von bis zu 160 Hz erzeugen einen großen Datenstrom. Hierzu wurden verschiedene Lasttests mit den Bildern durchgeführt, um potenziell relevante Features aus den Bildern performant zu erkennen und den Datenstrom zu minimieren. Ein wichtiger Schritt hierbei war die Implementierung eines Autoencoders, der in der Lage ist, die Bilder auf 15 bis 20 Werte zu reduzieren.

Weitere Features wie Pyrometerdaten sowie OCT-Werte werden mit bis zu 1 kHz aufgenommen und entweder aggregiert als Batch zu Verfügung gestellt oder auf feste Zeitstempel synchronisiert. Der Laser-Li-

nien-Scanner erzeugt nach Abschluss des Prozesses oder wahlweise auch lagenweise eine Punktwolke, die im PLY-Format übergeben wird.

Um die Prozessstabilität zu bewerten und Fehler sowie Abweichungen im Prozess zu identifizieren, wurden umfangreiche statistische Tests auf den bisherigen Proben durchgeführt. Insbesondere wurden Clusteranalysen verwendet, um Muster in den Daten zu erkennen und potenzielle Problemstellen frühzeitig zu identifizieren

### **Nutzung & Demonstration der adaptiven, KI-basierten Bearbeitung**

Das entwickelte Datenerfassungssystem wird zur Generierung von Trainingsdaten in verschiedenen Prozessbereichen verwendet. Die Daten werden mit CT-Analysen von den geschweißten Bauteilen zusammengeführt und die Offline-KI auf verschiedene Prozessbedingungen trainiert.

Im Rahmen des Projektes ist die Zusammenführung sowohl der Bahnplanung, Anlagensimulation, der Prozessdaten sowie der Ergebnisse der KI-Analysen in einem homogenen User-Cockpit geplant, sodass die Ergebnisse möglichst anlagennah und benutzerfreundlich zur effizienten Unterstützung zur Verfügung stehen.