


Schlussbericht Teil II: Eingehende Darstellung

zum Teilvorhaben	Komplexitätsreduktion der DED-Prozessentwicklung und Optimierung von DED-Prozessen durch KI-basierte Prognose und Anpassung geeigneter Prozess-Parameter auf Basis von Sensordaten
im Verbundprojekt	Artificial Intelligence Enhancement of Process Sensing for Adaptive Laser Additive Manufacturing (AI-SLAM)
Zuwendungsempfänger	BCT GmbH, Dortmund
Förderkennzeichen	01DM21005A
Gefördert durch	<p>GEFÖRDERT VOM</p>  Bundesministerium für Bildung und Forschung
Laufzeit des Vorhabens	01.04.2021 – 30.11.2024
Berichtszeitraum	01.04.2021 – 30.11.2024
Datum	25.03.2025
Verfasser	Dr. Jan Bremer BCT GmbH j.bremer@bct-online.de



Inhalt

Schlussbericht Teil II: Eingehende Darstellung.....	1
1 Einleitung	3
2 Ausgeführte Arbeiten.....	4
2.1 HAP1 Management.....	4
2.2 HAP 2 Spezifikation Task 2.1 Datenformate und Datapipelines.....	4
2.3 HAP 2 Spezifikation Task 2.4 Intermittierende Anpassungsstrategien basierend auf ML-Vorhersagen	5
2.4 HAP4 Sensorik Task 4.1 Schnittstellen-Maschinensteuerung.....	6
2.5 HAP4 Sensorik Task 4.2 Schnittstellen Sensorik.....	7
2.6 HAP4 Sensorik Task 4.3 Evaluation und Bewertung der Sensoren am ILT	8
2.7 HAP4 Sensorik Task 4.5 Integration geeigneter Sensorik bei Apollo	9
2.8 HAP5 Daten und KI Task 5.2 Datenverarbeitung.....	10
2.9 HAP5 Daten und KI Task 5.5 Veröffentlichung von Modellen als APIs für Software-Schnittstellen	11
2.10 HAP 6 Softwareentwicklung Task 6.1 Bahnplanung.....	13
2.11 HAP6 Softwareentwicklung Task 6.2 Implementierung eines iterativen, intermittierenden ML-adaptiven Prozessablaufs.....	14
2.12 HAP6 Softwareentwicklung Task 6.3 Benutzerschnittstelle/ Userinterface.....	15
2.13 HAP6 Softwareentwicklung Task 6.4 Tests und Optimierungen.....	17
2.14 HAP7 Erprobung, Bewertung, Demonstration und Benchmark Task 7.1 1D Test und Demonstration	17
2.15 HAP7 Erprobung, Bewertung, Demonstration und Benchmark Task 7.2 2D Test und Demonstration	18
2.16 HAP7 Erprobung, Bewertung, Demonstration und Benchmark Task 7.3 3D Test und Demonstration	19
2.17 HAP7 Erprobung, Bewertung, Demonstration und Benchmark Task 7.4 Bewertung des vorgeschlagenen Ansatzes	20
2.18 HAP7 Erprobung, Bewertung, Demonstration und Benchmark Task 7.5 Benchmarking.....	21
3 Notwendigkeit/Angemessenheit der Projektarbeiten.....	22
4 Voraussichtlicher Nutzen, Verwertbarkeit der Ergebnisse, Planungen.....	22
5 Bekannt gewordene Fortschritte anderer Stellen	22
6 Geplante Veröffentlichungen	22



Dieser Schlussbericht fasst die im Rahmen des Projekts AI-SLAM erarbeiteten Konzepte sowie deren prototypische Umsetzung und Erprobung zusammen.

Die beschriebenen Arbeiten wurden durch BCT-eigene, festangestellte qualifizierte Mitarbeiter erbracht. Unteraufträge zur Bearbeitung von Teilbereichen hat BCT nicht vergeben.

Um die Software-Entwicklungen bestmöglich zu unterstützen, erfolgten diese nicht getrennt von BCT's sonstigen Entwicklungen, sondern basierend auf der BCT-Rahmensoftware OpenARMS in den Versionen V2/V3 in Form von Modulen. Die in der Rahmensoftware enthaltenen Grundfunktionen - z.B. zum Import von CAD-Modellen und deren Anzeige - konnten so direkt verwendet werden.

Der wesentliche Kostenblock umfasst daher die angefallenen Personalkosten, sowie Reisekosten insbesondere zur Installation und Erprobung der Software an der Roboter-Anlage beim Fraunhofer ILT in Aachen.

1 Einleitung

Trotz weitreichender Fortschritte auf dem Gebiet der additiven Fertigung (AM), ist der signifikante Aufwand für die Prozessentwicklung einschließlich Bestimmung anwendungsspezifischer Prozessparameter und -strategien sowie für die Planung einer geeigneten Werkzeugbahn immer noch ein relevanter Kostentreiber. Der benötigte Set-Up-Aufwand für DED-Prozesse stellt ein Hindernis für deren breitere industrielle Anwendung dar. Diese wäre jedoch wünschenswert, da die Verfahren hinsichtlich ökonomischer, ökologischer und funktionaler Aspekte zunehmend wettbewerbsfähig werden oder konventionelle Herstellungsverfahren bereits übertreffen.

Das im Rahmen von AI-SLAM betrachtete Laser-Pulver Directed Energy Deposition (DED) Verfahren zeichnet sich durch vielseitige Anwendbarkeit z.B. für Beschichtungen, Reparaturen und additive Erstellung von Features, insbesondere auf Freiformflächen aus. In diesem Bereich liegen auch heute die meisten industriellen Anwendungen in einer Vielzahl von Industrien wie Luft- und Raumfahrt, Automobilindustrie, Werkzeugbau, Offshore, Energieerzeugung und Bergbau. Aber, sie beschränken sich häufig auf komplexe und kostenintensive Teile.

Der Grund für diese Beschränkung ist, dass bereits kleine Änderungen in der thermischen Prozessführung (z. B. Wärmeakkumulation aufgrund der Bearbeitungsdauer oder Abweichungen der aufgetragenen Schichtdicke durch aufbaustrategie-bedingter Überhitzungen) entsprechende Prozessanpassungen erfordern.

Diese korrigierenden Eingriffe erfolgen heute einerseits basierend auf aufwändigen iterativen Testreihen zur Ermittlung geeigneter Parameter und andererseits durch manuelle Eingriffe wie z.B. Änderungen der Prozessparameter oder Pausen zwischen dem Auftragen der einzelnen Lagen während des Prozesses.

Entscheidend für eine industrielle Nutzung und damit der Erschließung der Stärken des DED-Prozesses auch bei kleinen Losgrößen, ist eine Vereinfachung der Prozessentwicklung sowohl für Prozessingenieure als auch Maschinenbediener.



Hierbei kann der Einsatz künstlicher Intelligenz (KI), insbesondere des maschinellen Lernens (ML), innerhalb der angestrebten AI-SLAM-Lösung helfen, o.g. Herausforderungen des DED zu begegnen. Durch eine KI-basierte Unterstützung wird angestrebt, Aufwand und Komplexität der DED- Prozessentwicklung zu verringern, notwendigen Iterationen drastisch zu reduzieren und manuelle Eingriffe während des Prozessablaufs zu vermeiden.

Die anvisierte Lösung umfasst dabei den Einsatz von ML und Adaptionalgorithmen zur Modellierung der Aufbauszenarien, die Ableitung von Entscheidungsempfehlungen sowie die Optimierung der Prozessparameter. In AI-SLAM wird dafür beispielhaft eine adaptive Aufbaustrategie mit lagenweiser Anpassung der Werkzeugbahnen und ML-gestützter lokaler Anpassung der Prozessparameter untersucht.

2 Ausgeführte Arbeiten

2.1 HAP1 Management

Sowohl BCT als auch das ILT verfügen über langjährige Erfahrungen mit der Durchführung von Forschungsprojekten. In AI-SLAM hat ein regelmäßiger Austausch zwischen den deutschen Partnern, und - organisiert durch den kanadischen Partner NRC - ein zwei-wöchentlicher Austausch aller Partner stattgefunden. Die Diskussionen waren offen und konstruktiv und wurden durch die Perspektive des Endanwenders Apollo sowie der KI-Spezialisten Braintoy/NRC geleitet. Alle notwendigen Berichte wurden fristgerecht eingereicht.

Das Management der deutschen Seite war wegen der ausschließlichen Beteiligung des ILT und BCT einfach und verlief auch dank der Unterstützung durch den Projektträger ohne größere Probleme.

2.2 HAP 2 Spezifikation | Task 2.1 Datenformate und Datapipelines

2.2.1 Hintergrund

Wie in Industrie-Projekten üblich, wurden auch die AI-SALM Projektarbeiten mit der Aufstellung einer Spezifikation begonnen. Aufgabe dieser Spezifikation war die integrierte Darstellung der wesentlichen Bestandteile des Projekts mit einer Zuordnung der Arbeiten/Aufgaben zu den Partnern.

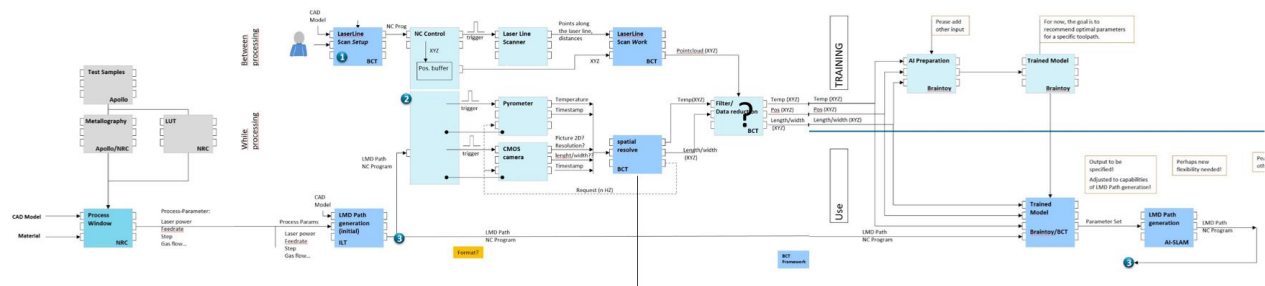


Abbildung 2-1: Überblick AI-SLAM, Komponenten, Aufgaben und Partner



2.2.2 Durchgeführte Arbeiten

Die erarbeitete Spezifikation (großer Überblick in Abbildung 2-1) enthält alle wichtigen Informationen zur Strukturierung der Arbeiten.

Um maschinelles Lernen zur Anpassung von Prozessen oder zur Vorhersage möglicher Prozess-Probleme einsetzen zu können, sind zunächst einmal entsprechenden Testdaten erforderlich. Diese müssen mögliche, realistische Prozessprobleme widerspiegeln. Die Konzeptionierung der Testbauteile erfolgte durch die kanadischen Partner Apollo als Endanwender. Das NRC und ILT haben hier aus der jeweiligen Perspektive unterstützt.

Da die BCT-Software im Projekt das verbindende Element darstellen sollte, mussten die Schnittstellen zu den einzelnen, nicht im BCT-System enthaltenen, Komponenten identifiziert und aufgeführt werden. Die zwischen den Komponenten auszutauschenden Daten und Formate wurden abgestimmt.

Zu den wichtigsten Aufgaben für BCT gehörte das Erfassen der erreichten Geometrie mittels Laser Linien-Scanner, sowie die Aufnahme von Prozessdaten (z.B. Pyrometer) und deren Zuordnung zum Ort des Geschehens. Diese Art der orts aufgelösten Speicherung der Daten sollt eine spätere Kontrolle der erreichten Qualität bzw. eine leichte Erkennung von Schäden ermöglichen.

➔ Ergebnis: Struktur des Projekts, Aufgabenteilung und Zuordnung zu den einzelnen Partnern erfolgt.

2.3 HAP 2 Spezifikation | Task 2.4 Intermittierende Anpassungsstrategien basierend auf ML-Vorhersagen

2.3.1 Hintergrund

Die grobe Projektstruktur sieht vor, Daten an das trainierte Machine-Learning System zu übermitteln und Ergebnisse entsprechender Auswertungen entgegenzunehmen. Ein festes, trainiertes Modell muss hierzu mit entsprechend aussagekräftigen Prozessdaten versorgt werden. Im Rahmen der Spezifikation wurden die relevanten Parameter durch die Prozess-Spezialisten im Konsortium identifiziert und festgelegt.

2.3.2 Durchgeführte Arbeiten

Zusammen mit dem ILT und Braintoy hat BCT unterschiedlichen Lösungen zur Anwendung und Umsetzung der vom ML-System ausgegebenen Empfehlungen, Anpassungen diskutiert.

Vorgehensweise A:

Bei diesem Ansatz werden dem KI-System Angaben zur Aufgabenstellung übermittelt (z.B: Materialpaarung, Geometrie etc.) und das KI-System erarbeitet damit einen ersten Vorschlag für die wichtigsten Prozessparameter.

Vorgehensweise B:

Bei diesem Ansatz werden während des Aufbaues einer Schicht, Prozessdaten aufgenommen und an das KI-System übermittelt. Prozessdaten können hierbei sowohl mit Thermokameras als auch mit Pyrometern gewonnen werden. Informationen über die erreichte Aufbauhöhe sollen nach jeder Schicht durch einen Laser-Linien-Scan gewonnen werden.



Das Konzept sah vor, diese Daten heranzuziehen, um eine lagen-weise Anpassung der Prozessparameter bereitzustellen.

- ➔ Ergebnis: das Konzept A benötigt keine wirkliche Interaktivität zwischen Prozess, Sensorik und ML-System, da es nur zuvor ermittelte Parameter verwendet.
- ➔ Ein Konzept zur Realisierung der Variante B mit lagenweiser Anpassung wurde von BCT und ILT abgestimmt. Die Schnittstellen wurden definiert, der mögliche Arbeitsablauf festgelegt.

2.4 HAP4 Sensorik | Task 4.1 Schnittstellen-Maschinensteuerung

2.4.1 Hintergrund

Der Einsatz des maschinellen Lernens zur Vereinfachung der DED-Prozessdefinition oder sogar der DED-Prozessführung erfordert zunächst realistisches Trainingsmaterial zum Anlernen und Testen des KI-Modells.

Die den Prozess beobachtenden Sensoren liefern zum größten Teil nur die isolierten Ergebnisse einzelner Messungen. Eine Verbindung zum Ort des Geschehens existiert zunächst einmal nicht. Die Aufzeichnung der Temperatur besteht ohne diese Kopplung in einer langen Liste einzelner Messwerte. Erst die Kombination von Messwert und Position, an der die Messung erfolgt ist, stellt einen für das Training der KI-Anwendungen geeigneten Datensatz bereit.

2.4.2 Durchgeführte Arbeiten

Im ersten Schritt der Arbeiten wurde die Kommunikation zwischen der BCT-Software und der Maschinen-Steuerung implementiert und getestet. Die Übertragung von Programmen zum Laser-Linien-Scannen zur dreidimensionalen Geometrieerfassung ist damit ebenso möglich, wie die Übertragung von NC-Programmen für den eigentlichen Auftragschweißprozess. Über diese Kommunikationsschnittstelle (bezeichnet als SO-Connect) lassen sich Programme starten und der Maschinenzustand überwachen.

Neben diesen eher herkömmlichen Aufgaben dient die implementierte Schnittstelle aber in erster Linie der Speicherung von Positionen an denen Messungen erfolgt sind.

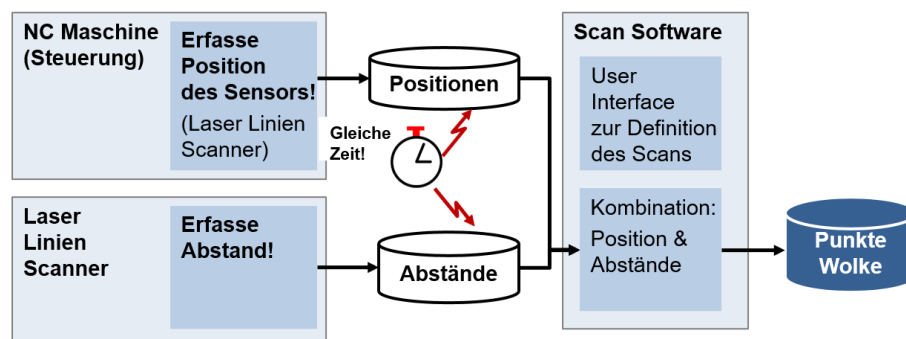


Abbildung 2-2: Aufnahme der Laser-Linie und der jeweiligen Messposition

Ausgelöst durch ein sog. Triggersignal werden zeitgleich die Messung durch die Sensoren, als auch die Positionen der Maschinen-Achsen erfasst. Eine nachfolgende Kombination beider Informationen erzeugt eine örtlich aufgelöste Darstellung der Messungen. In dieser Datenmenge lassen sich die Messwerte direkt am Ort des Geschehens beurteilen. Solche Darstellungen bilden



dann z.B. die Grundlage für eine Punktwolke, welche die Oberfläche der erstellten Schweißung abbildet, oder aber ein Gesamt-Darstellung des Temperaturverlaufs aufgezeichnet über die Schweißung einer Lage.

Zur Realisierung der obigen Aufgaben hat BCT neben der SO-Connect Schnittstelle auch die zum Anschluss der Sensorik benötigten Steuerungs-Treiber in der BCT-Rahmen-Software OpenARMS entsprechend weiterentwickelt und an der ILT-Maschine installiert.

- ➔ Ergebnis: Stabile Kommunikation zwischen der Anwendung und der BCT-Software mit einem zuverlässigen Austausch der Daten zur späteren Synchronisation mit den Messwerten.

2.5 HAP4 Sensorik | Task 4.2 Schnittstellen Sensorik

2.5.1 Hintergrund

Im Rahmen des Projekts werden unterschiedliche Sensoren zur Erfassung von Prozessdaten und geometrischen Informationen eingesetzt. Die Art der Messung ist hierbei genauso unterschiedlich wie die resultierenden Daten und die Sensoren selbst. Um in diesem inhomogen Umfeld Daten aus dem Prozessgeschehen innerhalb der Maschine erfassen zu können, waren umfangreiche Entwicklungen von entsprechenden Schnittstellen erforderlich.

2.5.2 Durchgeführte Arbeiten

Die durchgeführten Arbeiten gliedern sich nach den eingesetzten Sensortypen.

Laser-Linien-Scanner: Dieser Sensor wird eingesetzt, um die erzeugte Geometrie nach erfolgter Schweißung z.B. einer Lage zu erfassen. Zusätzlich dient das Scannen dazu, die Grundgeometrie von Bauteilen zu erfassen, auf die funktionale Elemente aufgebracht oder die im Rahmen einer Reparatur bearbeitet werden sollen.

Auf Basis des Software Development Kits (SKD) des Sensorherstellers hat BCT einen entsprechenden Treiber entwickelt, mit dem der Sensor angesteuert und Daten entgegengenommen werden können. Tests hierzu wurden dabei sowohl am ILT als auch auf der bei BCT zur Verfügung stehenden Maschine durchgeführt.

Auf der Hardwareseite wurden, zusammen mit dem ILT, Halterungen für die Montage des Sensors erarbeitet. Entsprechende Kabelverbindungen wurden realisiert. Verbliebene Positionungenauigkeiten lassen sich durch entsprechende Kompensationen und Kalibrierungen beheben, die mit der BCT- Software verfügbar sind.

Pyrometer werden zur Erfassung von Temperaturen während der Ausführung des Schweißprozesses eingesetzt. Um nicht - abhängig vom jeweiligen Sensor-Typ/Sensor-Hersteller - eine unüberschaubare und nicht mehr wartbare Menge an Schnittstellen zu entwickeln, hat sich in dem technischen Bereich von AI-SLAM der Einsatz des NI cDAQ-Systems von National Instruments bewährt. Es unterstützt eine Vielzahl physikalischer Sensor mit Modulen, die speziell für das jeweilige Messprinzip entwickelt wurden und lässt sich per USB oder Ethernet an die PC-Hardware anschließen, um dort die Daten entgegenzunehmen und zu verarbeiten.

Um die Daten innerhalb der BCT-Umgebung verarbeiten zu können hat BCT im Projekt ein Softwaremodul OpenDATA in Form eines eigenständigen Service erarbeitet. Dieser Service stellt



das Interface zwischen der Software auf der einen Seite und dem Ni cDAQ auf der anderen Seite dar.

Innerhalb des zur Verwaltung aller Elemente eines Projekts verwendeten Projektbaums wird das OpenDATA Element - z.B. in Kombination mit der Maschine als Quelle von Positionsdaten - verwendet, um so eine Verbindung von Ort und Messwert herstellen zu können.

CMOS: Neben den zeilenförmig vorliegenden Daten des Laser-Linien-Scanners und den punktwise vorliegenden Pyrometerdaten, handelt es sich bei CMOS-Daten um Kamerabilder, also um 2D-Datensätze. Diese wurden im Prozess ebenfalls aufgenommen, aber nicht in der BCT Software dargestellt.

Generell wurden in diesem Arbeitspaket der OpenDATA Service implementiert, sowie die Anbindung des NI cDAQ-System und des OpenDATA Services erarbeitet und implementiert

- Ergebnis; Basierend auf den erfolgten Arbeiten konnten während des Prozesses über die Schnittstellen entsprechende Prozessdaten aufgenommen und visualisiert werden

2.6 HAP4 Sensorik | Task 4.3 Evaluation und Bewertung der Sensoren am ILT

2.6.1 Hintergrund

Ziel der Integration unterschiedlicher Sensoren in den Prozess selbst bzw. in den Prozessablauf hatten das Ziel, die ML-Systeme mit entsprechenden Daten zu versorgen.

2.6.2 Durchgeführte Arbeiten

Zusammen mit dem ILT hat BCT die Sensoren an die Anlage angeschlossen, die Datenaufnahme realisiert und mit der BCT-Software verbunden. Bei all den dazu nötigen Arbeitsschritten haben BCT und ILT die Qualität der Daten beurteilt und bewertet. Im Falle, dass die Daten nicht den Anforderungen entsprachen, wurden entsprechende Anpassung an der Software oder an den Sensor-Einstellungen vorgenommen.

- Ergebnis: Nach erfolgten Arbeiten konnten CMOS-Kamera, Pyrometer und Laserlinienscanner für die Aufnahme von Daten zur ML-gestützte DED-Prozessoptimierung eingesetzt werden. Die Ergebnisse dienten dann als Trainingsdatensatz für die ML-Entwicklung.



2.7 HAP4 Sensorik | Task 4.5 Integration geeigneter Sensorik bei Apollo

2.7.1 Hintergrund

Um die Entwicklungen auf einer breiteren Basis testen zu können, sollte neben der am ILT verfügbaren kartesischen Maschine auch eine spezialisierte Maschine beim kanadischen Partner Apollo mit entsprechender Software und Sensorik ausgestattet werden. Grundlagen hierfür wurden in den Arbeitspaketen 4.3 und 4.4 gelegt.

Wie oben bereits beschrieben beschränken sich die dafür nötigen Arbeiten jedoch nicht auf den Anschluss der Software zur Übertragung von NC-Programmen, sondern erfordern auch hier Entwicklungen zur Realisierung einer orts aufgelösten Darstellung der Messwerte.

Sowohl die Kinematik der Maschine (XYZ-Kinematik im Kopf mit zusätzlicher Rotationsachse im Werkstück, ähnlich einer Drehbank) als auch deren Steuerung unterscheiden sich von der ILT-Maschine signifikant.

2.7.2 Durchgeführte Arbeiten

Zur Vorbereitung des Anschlusses an die Maschine, ausgestattet mit einer speziellen FANUC Steuerung FANUC Oi, hat BCT mit dem Steuerungshersteller mögliche Lösungen hinsichtlich des Anschlusses der BCT-Software beraten und konzipiert. Hierbei ist zu beachten, dass Steuerungen dieses Herstellers nur eingeschränkte Kommunikationsmöglichkeiten mit externen Systemen vorsehen und damit nicht mit einer Siemens-Steuerung verglichen werden können.

Da eine Entwicklung ohne direkten Zugriff auf Maschine und Steuerung extrem aufwendig ist, hat BCT eine Simulator-Version der Steuerung beim Hersteller ausgeliehen. Hiermit konnten prinzipielle Bestandteile einer Kommunikationslösungen aufgesetzt und erprobt werden. BCT hat tiefgreifende Entwicklungen am FANUC Treiber durchgeführt. Oft wurden diese Arbeiten dabei durch Einschränkungen der Steuerung blockiert, alternative Lösungen mussten gesucht werden.

Basierend auf den BCT-Vorarbeiten bestand letztendlich zwischen den Partnern Apollo und BCT Einigkeit darüber, dass ein Anschluss der Software einen mehrwöchigen Zugriff auf die auch für die Produktion benötigte Maschine erforderlich macht. Eine Reservierung der Maschine für einen solch langen Zeitraum war im industriellen Umfeld von Apollo jedoch – trotz Projektverlängerung – nicht realisierbar.

Alternativ hat BCT dann eine Softwareversion zur Erstellung von Auftragschweiß-Programmen zur Verfügung gestellt. Diese konnten nach weiteren Schwierigkeiten mit dem Kopierschutz der Software und der eingesetzten PC-Hardware installiert und auch eingesetzt werden. Lediglich die Komponente „Erfassung der Bauteil-Ist-Geometrie“ konnte nicht realisiert werden. Apollo hat die BCT-Software dann für einfache Aufschweißungen eingesetzt.

- ➔ Ergebnis: In diesem AP konnte nur ein Teilziel, die Erstellung von NC-Programme für das Aufschweißen rotationssymmetrischer Bauteile realisiert werden. Entsprechende NC Programme wurden durch Apollo erstellt und getestet.

2.8 HAP5 Daten und KI | Task 5.2 Datenverarbeitung

2.8.1 Hintergrund

Wie in AP4.2 beschrieben, wurde die Maschine beim ILT mit unterschiedlichen, zur Prozessbeobachtung geeigneten Sensoren ausgestattet. Die Synchronisation der Daten mit den Maschinenpositionen führt zu einer homogenen, orts aufgelösten Darstellung der Daten. Diese Datensätze bilden damit die Ausgangslage für die Verwendung der Daten zum Training der ML-Modelle.

2.8.2 Durchgeführte Arbeiten

Die Synchronisation der Daten und die damit mögliche Ortsauflösung bilden den Ausgangspunkt für weitere Vorbereitungen der Daten hinsichtlich der Verwendungen für eine KI-Unterstützung. Bevor diese Daten sich als Trainings- oder Eingabedaten für KI-Anwendungen eignen sind noch weitere Vor-Bearbeitungen erforderlich.

In diesem Rahmen hat BCT entsprechende Funktionen weiterentwickelt, um die Datenaufbereitung innerhalb eines automatisierten Prozessablaufs durchführen zu können. Folgende Funktionalitäten wurden erweitert oder neu konzipiert:

Subsampling:

Diese Methode erlaubt eine Reduzierung der Punktemengen basierend auf dem räumlichen Abstand der Messpunkte zueinander. Erreicht wird hier hierdurch eine homogene Verteilung der Messpunkte mit relativ konstanten Abständen der Punkte untereinander.

Outlier Removal:

Diese sehr grundlegende Vor-Verarbeitung der Messwerte entfernt Messpunkte, die einen gewissen Abstand zur Mehrheit der Punkte aufweisen. So lassen sich unbeabsichtigt erfasste Bereiche von Bauteilen oder Spannvorrichtungen eliminieren.

Cropping:

Diese grundlegende Funktion beschränkt die resultierende Datenmenge auf einen geometrisch begrenzten Bereich. Die Bereichsgrenzen können angegebene werden,

- ➔ Ergebnis: In Kombination bereiten diese Funktionen die Messdaten derart vor, dass sie sich im Rahmen weiterer Arbeiten mit KI einsetzen lassen. Die Reduzierung der Rechenzeiten durch Stabilisierung der Algorithmen hat die Einsatzmöglichkeiten erhöht und macht diese Verfahren auch einem automatischen Ablauf zugänglich.

2.9 HAP5 Daten und KI | Task 5.5 Veröffentlichung von Modellen als APIs für Software-Schnittstellen

2.9.1 Hintergrund

Nach Aufnahme und Vorbereitung der Prozessdaten werden diese an die KI-Spezialisten im Konsortium zum Aufbau und der Erprobung von KI-Modellen weitergegeben. Auf Seiten von BCT gilt es dann, die trainierten Modelle, oder Ergebnisse daraus, in den allgemeinen Workflow einzubinden. Um dies zu realisieren sind die Schnittstellen zwischen den Komponenten abzustimmen und anschließend zu implementieren. Das realisierte Konzept stellt trainierte KI-Modelle auf einem Cloud Server zur Verfügung (BrainToy).

2.9.2 Durchgeführte Arbeiten

Das Zusammenwirken von Datenaufnahme, Vorbereitung und Einbindung der KI-Modelle wurde zwischen BCT und den beteiligten kanadischen Partnern BrainToy und McGill in den regelmäßigen Projektbesprechungen abgestimmt.

Die entsprechenden Interfaces zwischen der BCT-Software und dem von BrainToy erarbeiteten KI-Modell wurden erstellt.

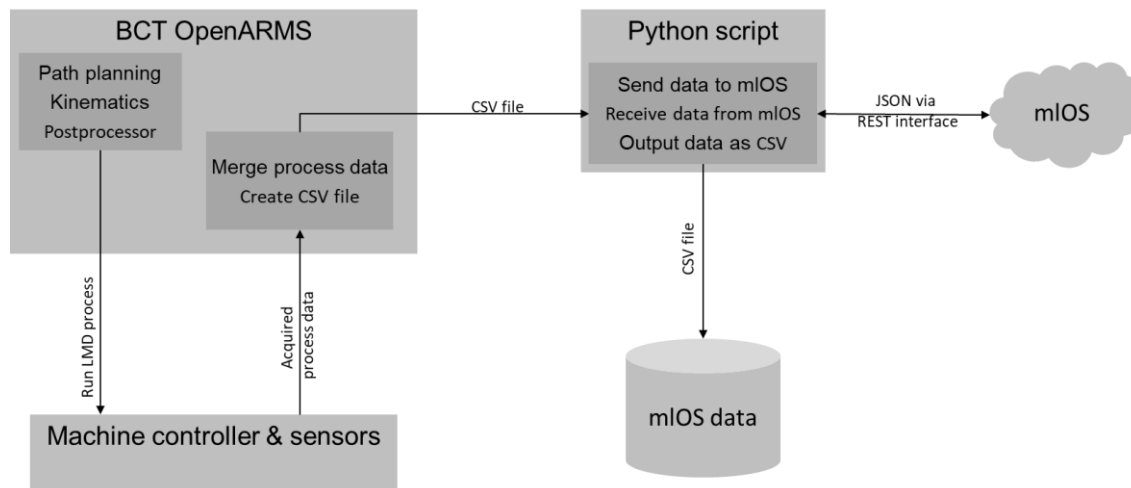


Abbildung 2-3: Prozessablauf mit Realisierung der mIOS-Schnittstelle über ein Python-Skript

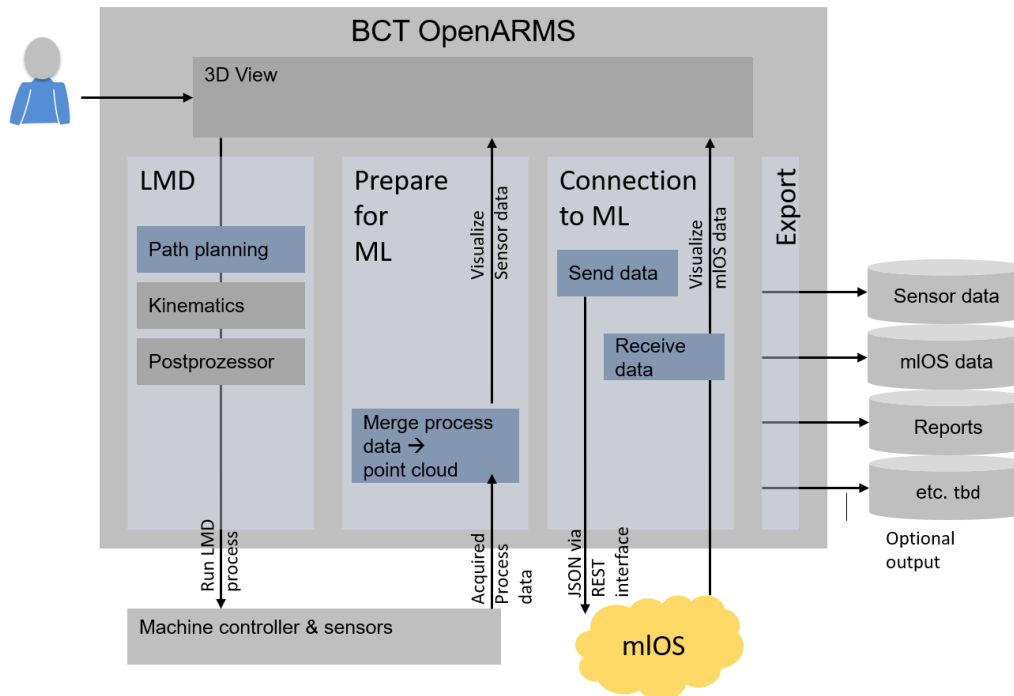


Abbildung 2-4: Prozessablauf bei vollintegrierter mIOS-Schnittstelle.

```

Test API => https://www.aislam.mlos.io/api/v1/mlasaservice
Features-post Samples-post Predict-post
Header
1 {
2   "Content-Type": "application/json",
3   "apikey": "__CLIENT_API_KEY_HERE__",
4   "api": "predict",
5   "Authorization": "__AUTHORIZATION_TOKEN_HERE__",
6   "Cache-Control": "no-cache"
7 }

Payload - predict
1 {
2   "data": [
3     [
4       0.57,
5       3.68,
6       2088,
7       4.9,
8       233,
9       38,
10      69,
11      10.4,
12      "49%"
13     ],
14     [
15      0.74,
16      5.48,
17      3987,
18      5.4,
19      218,
20      13,
21      30.

```

```

API Response - predict
1 {
2   "error": false,
3   "results": {
4     "error": false,
5     "results": {
6       "class_label": [
7         [
8           0,
9           1
10        ]
11      ],
12      ],
13      ],
14      "error": false,
15      "explanation": [
16        {
17          "feature": "TotalHeight",
18          "normweight": 0,
19          "weight": 0
20        },
21        {
22          "feature": "TotalWidth",
23          "normweight": 0,
24          "weight": 0
25        },
26        {
27          "feature":
28            "LaserPowerDeliveredtoWorkpiece",
29          "normweight": 1,
30          "weight": 0.583
31        },

```

Abbildung 2-5: JSON Struktur der mIOS-API

Die Kommunikation zwischen den Systemen erfolgte in der für KI-Anwendungen üblichen Programmiersprache Python. Entsprechende Scripts wurden erstellt und erprobt. Innerhalb des BCT Softwarepakets OpenARMS wurden die Vorbereitungen zur Einbindung der Schnittstellen getroffen. Es wurden Funktionen implementiert und getestet, die die Kommunikation mit REST-APIs ermöglichen. Zudem wurden JSON als Protokollsyntax in OpenARMS aufgenommen.

2.10 HAP 6 Softwareentwicklung | Task 6.1 Bahnplanung

2.10.1 Hintergrund

Innerhalb von DED-Anwendungen kommt der Bahnplanung eine große Bedeutung zu. Bahnen für die unterschiedlichen Aufbaustrategien wie kartesisch oder Rotation-Axial und Rotation-Radial werden benötigt um eine Vielzahl unterschiedlicher Anwendungsfälle abzudecken.

Die im Projekt zum Test eingesetzte Baggerschaufel verwendet einen kartesischen Aufbau, während zur Bearbeitung von Beschädigungen an Wellen oder unrunder Bauteile eine radiale Aufbaustrategie sinnvoll ist.

2.10.2 Durchgeführte Arbeiten

Sowohl auf Seiten des ILT als auch bei BCT stehen sog. Slicer zur Aufteilung der gewünschten Bauvolumen zur Verfügung.

Der ILT-Slicer wurde in die BCT-Software eingebunden, um hier einen übersichtlichen Work-Flow zu ermöglichen. Die innerhalb der Anwendungen zu füllenden Volumen können dabei entweder durch CAD-Modelle oder basierend auf zuvor durchgeführten Scans definiert werden.

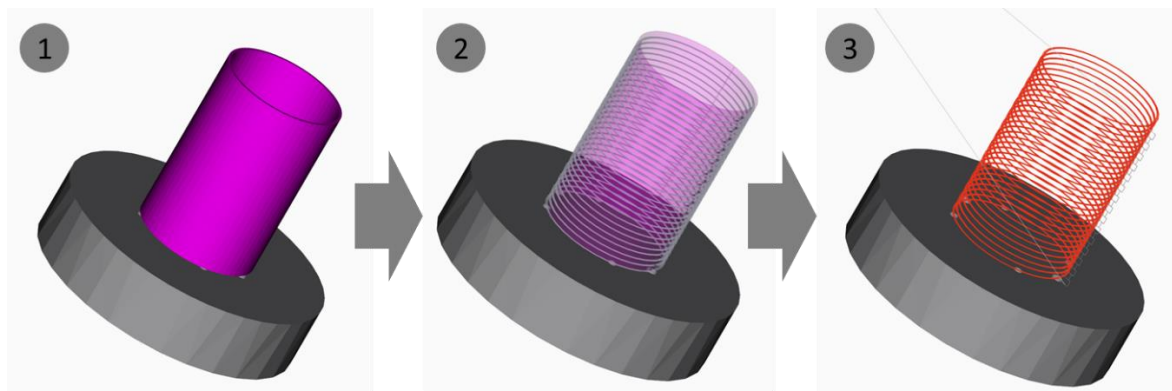


Abbildung 2-6: Ablauf der Bahnplanung in OpenARMS. 1. Zielgeometrie, 2. Slicer-Resultat, 3. Fertige Bahnen.

BCT hat den ILT-Slicer durch Einbindung der zur Verfügung gestellten Library in die Software integriert. Alle für die Bahngenerierung benötigten Parameter lassen sich in der BCT Software eingeben. Die Weiterleitung an die eigentliche Berechnung erfolgt dann automatisch.

Auch die vom ILT-Slicer ermittelten einzelnen Spuren werden in das BCT interne Format zur Darstellung von Bahnen übertragen. Somit lassen sie sich in der Software direkt anzeigen. Eine visuelle Kontrolle der Ergebnisse ist möglich.



Wesentlich aufwendiger als die Einbindung eines externen Slicer-Moduls waren die BCT eigenen Entwicklungen eines Slicers für Rotationsteile. Arbeiten kartesische Slicer lagenweise, so versucht man beim Aufschweißen rotationssymmetrischer oder größtenteils rotations-symmetrischer Bauteile hinsichtlich einer guten Oberfläche die Anzahl der Start und Stopp-Positionen zu minimieren. In speziellen Fällen ist der entsprechende BCT-Slicer fähig, Aufschweißungen eines gesamten Bauteilbereichs mit nur einer helix-förmigen, über mehrere Höhen verteilten Bahn zu realisieren.

Für typische, bei Apollo zu bearbeitenden Bauteilen, ist ein radialer Aufbau sehr gut geeignet. Die BCT-Entwicklungen haben zu einer Lösung geführt, die ausgehend vom Scan des vorbereiteten Bauteils entsprechende Bahnen berechnen und ausgeben kann.

- ➔ Ergebnis: Einbindung des ILT Slicers in die BCT-Anwendungssoftware einschließlich Bedieneroberfläche zur Eingabe der benötigten Parameter. BCT eigene Slicing Methoden zum Auftragen auf rotationssymmetrische Bauteile entweder in Achsrichtung oder radial. Grafische Anzeige der Werkzeug-Bewegungen durch hinterlegte Maschinen-Modelle und Kinematik-Beschreibungen.

2.11 HAP6 Softwareentwicklung | Task 6.2 Implementierung eines iterativen, intermittierenden ML-adaptiven Prozessablaufs

2.11.1 Hintergrund

Ein KI-unterstützter Prozessablauf erfordert eine klare Definition und Verwaltung der Prozessschritte. BCT hat basierend auf der aktuellen Software-Version entsprechende Entwicklungen gestartet, um einen automatisierten DED-Prozess zu unterstützen. Dies umfasst das Scannen der Bauteiloberfläche, die Erfassung von Prozessdaten mit OpenDATA, die DED-Bahnplanung und die Berechnung der benötigten NC-Programme durch ein Kinematikmodul und einen Postprozessor.

2.11.2 Durchgeführte Arbeiten

Die Struktur zur Verwaltung der Prozesse innerhalb eines Projektbaums wurde erweitert, um einen reibungslosen Datenaustausch zu ermöglichen. Elemente können hinzugefügt und Einstellungen angepasst werden. Diese Arbeiten bilden die Grundlage für KI-basierte Prozessketten, die entweder die Prozessparameter für den gesamten Bauvorgang ermitteln oder die Parameter während des Prozesses anpassen.

- ➔ Ergebnis: Die BCT-Arbeiten im Projekt haben einen flexiblen Aufbau von Prozessabläufen durch die Integration entsprechender Prozessmodule in eine Prozesskette realisiert. Die Prozesse können durch externe Eingaben oder Daten beeinflusst werden, um die Empfehlungen der KI zu berücksichtigen.

2.12 HAP6 Softwareentwicklung | Task 6.3 Benutzerschnittstelle/ Userinterface

2.12.1 Hintergrund

Je mehr Prozesse in einen Ablauf zu integrieren sind, je komplexer die eigentlichen Anwendungen werden, um so größer wird die Belastung der Anlagenbediener. Verstärkt wird dieser Effekt durch die Tatsache, dass es sich bei Bauteilen, die mittel DED-Verfahren bearbeitet oder repariert wird um sehr hochwertige Komponenten handelt.

Die Bedieneroberfläche einer Software wie der in AI-SLAM verwendeten BCT-Basissoftware kommen somit unterschiedliche Aufgaben zu. Auf der einen Seite müssen alle Prozessschritte und die entsprechenden Details und Einstellungen verwaltet werden, auf der anderen Seite muss die Schnittstelle zum Bediener übersichtlich bleiben, um den Anlagenbediener nicht zu überfordern.

2.12.2 Durchgeführte Arbeiten

BCT hat die im Rahmen von AI-SLAM notwendigen funktionalen Module wie Filter, Slicer und Schnittstellen zu KI unter einer einheitlichen Bedieneroberfläche integriert. Die Prozesse sind übersichtlich entsprechend ihrer Ausführungs-Reihenfolge in einer Baumstruktur angeordnet. Alle wichtigen Einstellungen sind hierüber zugänglich, lassen sich aber auch im Sinne einer besseren Übersichtlichkeit verbergen.

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die durch die Projektarbeiten erweiterten Möglichkeiten einer Prozesskenntnis-Definition mit den typischerweise für DED-Anwendungen benötigten Prozessen.

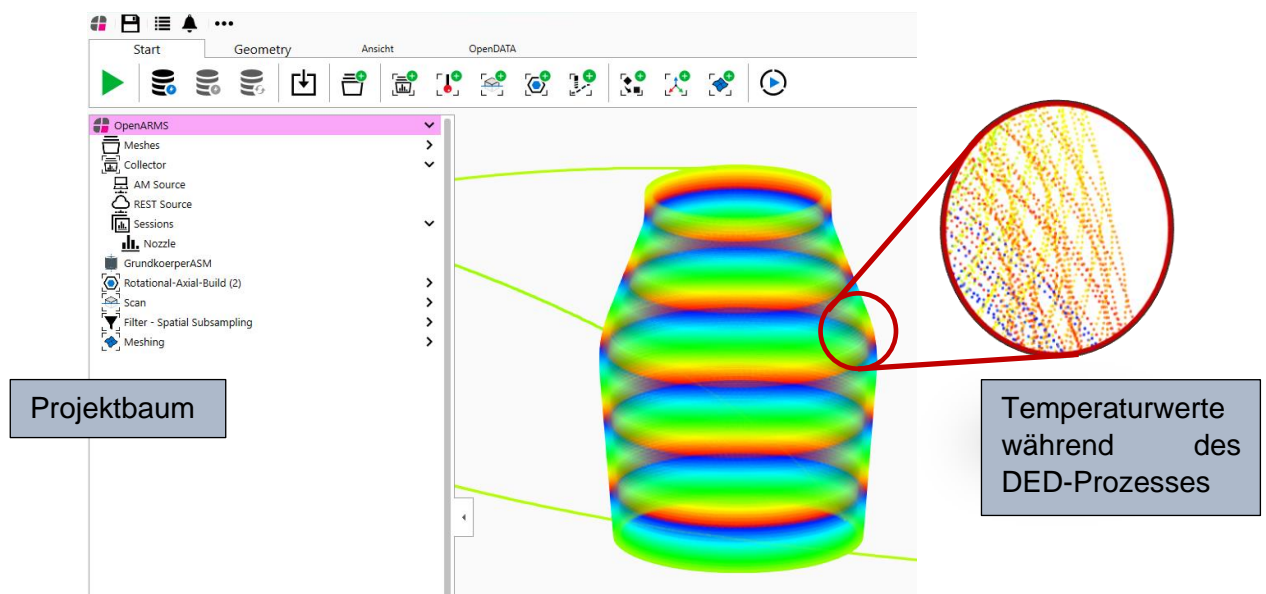
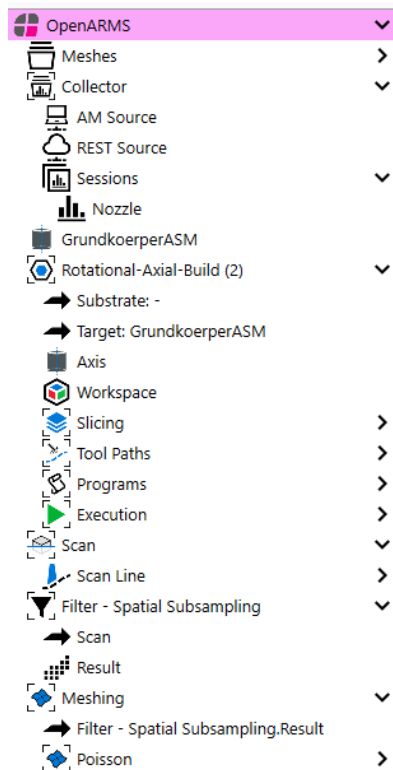


Abbildung 2-7: UI in OpenARMS



Der Projektbaum dient der Strukturierung des Prozessablaufs. Er enthält alle für die Gesamtprozesskette notwendigen Elemente. Hierzu zählen neben den Elementen zur Prozessdaten-Akquise (Data-Sources: Active Machine (AM) Source, REST Source) alle Elemente, die den Prozess direkt steuern. Analog hierzu werden in Scan-Prozessen alle Schritte gebündelt, die für die geometrische Erfassung der Bauteile mittels Laser-Linien-Scanner erforderlich sind. Darüber hinaus enthält der Projektbaum alle Unterprozesse zum Filtern und Vermaschen von Punktwolken.

Abbildung 2-8: Projektbaum

Die in der Software hinterlegte Maschinenbeschreibung einschließlich der kinematischen Kette ermöglicht eine Simulation des Bearbeitungsablaufs zur Vorab-Kontrolle. Auf diese Weise kann der Anlagenbediener schon vor Ausführungen der Bearbeitungen entsprechenden Einblick bekommen und gegebenenfalls korrigierend eingreifen.

- ➔ Ergebnis: Wie in den obigen Abbildungen gezeigt, ist die Bedieneroberfläche geeignet, Prozesse zu verwalten, und die Ergebnisse der einzelnen Berechnungsschritte anzuzeigen.

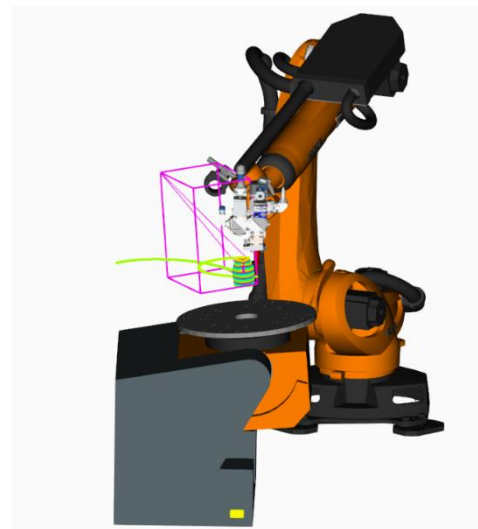


Abbildung 2-9: Maschinensimulation

2.13 HAP6 Softwareentwicklung | Task 6.4 Tests und Optimierungen

2.13.1 Hintergrund

Obwohl es sich bei den im Rahmen des Projekts durchgeführten Arbeiten um vorwettbewerbliche Entwicklungen handelt, sollte die Software doch soweit robust und stabil sein, dass ein sicherer Ablauf des Gesamtprozesses gewährleistet werden.

2.13.2 Durchgeführte Arbeiten

Im Rahmen der Softwareentwicklung wurde die Software in mehreren Iterationen getestet und immer weiter optimiert. Bei den Optimierungen handelte es sich zum einen um notwendige Bugfixes, die ein

- Ergebnis ist eine größtenteils stabile Software, die durch einen geschulten Benutzer größtenteils intuitiv bedienbar ist.

2.14 HAP7 Erprobung, Bewertung, Demonstration und Benchmark | Task 7.1 1D Test und Demonstration

2.14.1 Hintergrund

Um erste Versuche möglichst einfach zu halten, wurden zunächst einzelne Spuren schweißtechnisch aufgebracht. Hierzu wurde zunächst das Substrat mittels Laser-Linien-Scanner erfasst, um eine geometrisch adaptive Bahnplanung zu ermöglichen. Die Versuche wurden an der Anlage des Fraunhofer ILT durchgeführt. Während des Schweißprozesses wurde die Schmelzbadtemperatur mittels Pyrometer aufgenommen und in OpenARMS örtlich aufgelöst. Die aufgenommenen Messdaten wurden anschließend an ML-Modelle der Projektpartner gesendet, um Aussagen über die Qualität der Schweißung treffen zu können.

2.14.2 Durchgeführte Arbeiten

BCT hat die Versuche unterstützend begleitet. Die tatsächliche Durchführung erfolgte durch das Fraunhofer ILT. Im Rahmen der Versuche wurden Einzelspuren mit variierenden Schweißparametern aufgetragen.



Abbildung 2-10: Aufgeschweißte Einzelspuren

Während des Prozesses wurden mittels Pyrometer die Schweißtemperaturen ermittelt und mit Hilfe von OpenARMS orts aufgelöst dargestellt.

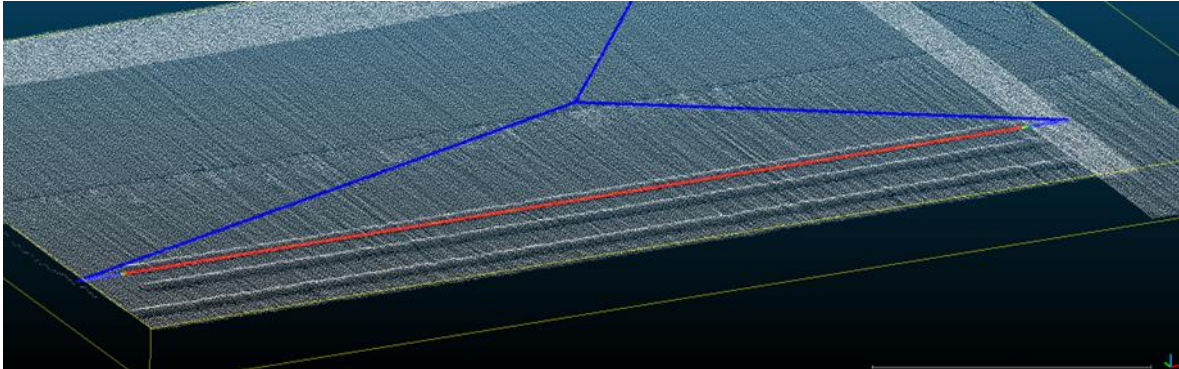


Abbildung 2-11: Temperaturwerte während des DED-Prozesses.

Im Anschluss an die Messung wurde das Substrat gemeinsam mit allen Einzelspuren mittels Laser-Linien-Scanner geometrisch erfasst.

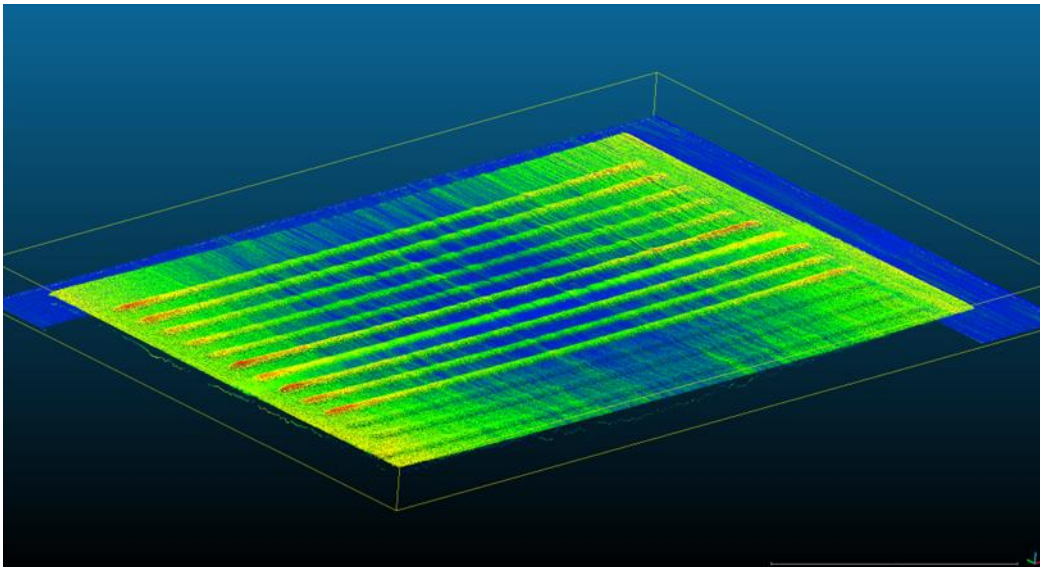


Abbildung 2-12: Erfasste Geometrie der Einzelspuren.

2.15 HAP7 Erprobung, Bewertung, Demonstration und Benchmark | Task 7.2 2D Test und Demonstration

2.15.1 Hintergrund

Um die Komplexität der Versuche zu erhöhen, wurden im nächsten Schritt zweidimensionale Strukturen schweißtechnisch aufgebracht.

2.15.2 Durchgeführte Arbeiten



Abbildung 2-13: Beispiel für eine 2D-Geometrie auf gekrümmter Oberfläche.

BCT hat die Versuche unterstützend begleitet. Die tatsächliche Durchführung erfolgte durch das Fraunhofer ILT. Im Rahmen der Versuche wurden zweidimensionale Strukturen mit variierenden Schweißparametern auf gekrümmten Oberflächen aufgetragen. Während des Prozesses wurden mittels Pyrometer die Schweißtemperaturen ermittelt und mit Hilfe von OpenARMS orts aufgelöst dargestellt.

2.16 HAP7 Erprobung, Bewertung, Demonstration und Benchmark | Task 7.3 3D Test und Demonstration

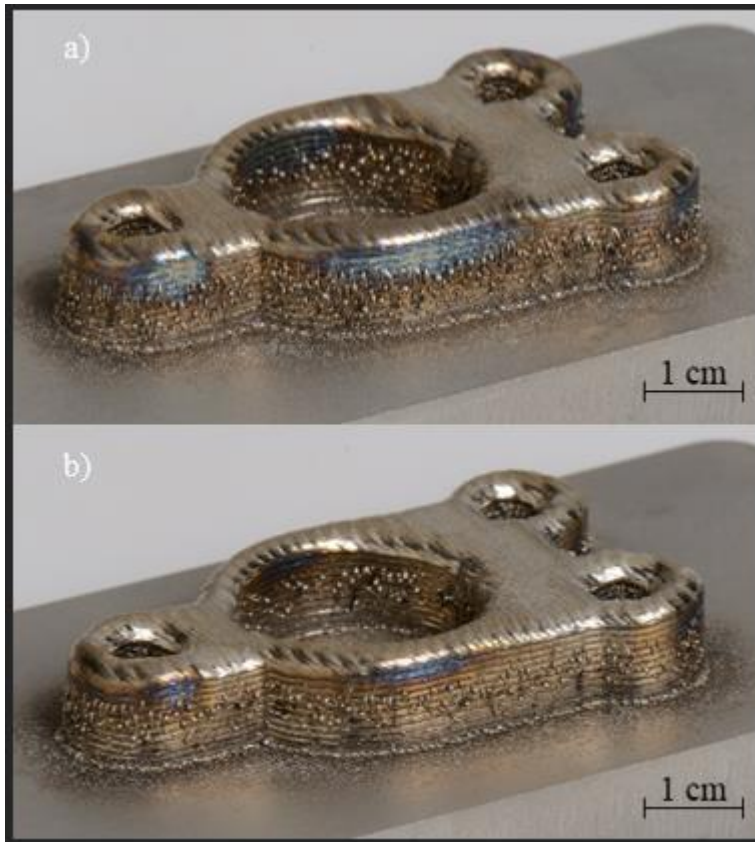
2.16.1 Hintergrund

Um die Komplexität der Versuche weiter zu erhöhen, wurden im dritten Schritt dreidimensionale Strukturen schweißtechnisch aufgebracht. Hierzu wurden zunächst einfache Würfel-Geometrien verwendet, um die grundlegenden Prozesse zu testen. Das langfristige Ziel sind jedoch komplexere Demonstrator-Geometrien.

2.16.2 Durchgeführte Arbeiten

Das Substrat wurde auch hier mittels Laser-Linien-Scanner erfasst, um eine geometrisch adaptive Bahnplanung zu ermöglichen. Zusätzlich wurden Slicer-Tests durchgeführt, um die Schichtplanung zu optimieren.

Die Versuche wurden unter den gleichen Rahmenbedingungen wie Task 7.1 und 7.2 erneut an der Versuchsanlage des Fraunhofer ILT durchgeführt.



2.17 HAP7 Erprobung, Bewertung, Demonstration und Benchmark | Task 7.4 Bewertung des vorgeschlagenen Ansatzes

2.17.1 ML-Integration

Die Integration von maschinellem Lernen (ML) in den Schweißprozess zeigte gemischte Ergebnisse. Der intermittierende Ansatz wurde im Projekt nicht weiterverfolgt, da er sich als weniger praktikabel und effizient erwies. Stattdessen erwies sich die Vorhersage von initialen Schweißparametern als äußerst vielversprechend. Diese Methode ermöglichte eine präzisere und effizientere Planung der Schweißprozesse, was zu einer signifikanten Verbesserung der Qualität der Endprodukte führte. Die ML-Modelle konnten erfolgreich genutzt werden, um die Schweißparameter zu optimieren und somit die Prozessstabilität zu erhöhen.

2.17.2 Software-Prozesskette

Der modulare Aufbau der Software-Prozesskette bietet flexible und vielseitige Möglichkeiten zur Planung von Prozessketten. Die Einzelmodule erwiesen sich als weitestgehend stabil und zuverlässig, was die Robustheit des Systems unterstreicht. Besonders hervorzuheben ist, dass die entwickelten Ansätze auch auf Nicht-ML-Prozesse übertragbar sind, was die Vielseitigkeit und Anwendbarkeit der Software erheblich erhöht. Dies ermöglicht eine breitere Nutzung der Software in verschiedenen industriellen Anwendungen und trägt zur Effizienzsteigerung bei.



2.17.3 Maschinenanbindung

Die Anbindung der Maschinen stellte sich als herausfordernd heraus und ist stark abhängig von der Art der Maschinensteuerung. Während die Siemens S840D und KUKA KRC4 Steuerungen problemlos funktionierten und eine reibungslose Integration ermöglichten, war die Anbindung an Fanuc-Steuerungen nur sehr eingeschränkt möglich. Eine Anbindung an die Anlage von Apollo war im Rahmen des Projekts nicht möglich. Diese Einschränkungen zeigen, dass die Maschinenanbindung noch weiter optimiert werden muss, um eine breitere Kompatibilität und Flexibilität zu gewährleisten. Eine verbesserte Maschinenanbindung würde die Einsatzmöglichkeiten des Systems erheblich erweitern.

2.17.4 Sensorik

Die Möglichkeiten der Sensoranbindung erwiesen sich als sehr gut und trugen wesentlich zur Prozessüberwachung und -kontrolle bei. Der Laser-Linien-Scanner und die Basler-Kameras konnten problemlos per SDK angebunden werden, was eine präzise Erfassung der Geometrien ermöglichte. Das Pyrometer wurde erfolgreich per Ni-DAQ integriert und lieferte zuverlässige Temperaturmessungen während des Schweißprozesses. Diese Sensoren ermöglichten eine detaillierte Überwachung und Analyse der Schweißprozesse, was zu einer verbesserten Prozesskontrolle und -qualität beitrug.

2.17.5 Benutzerfreundlichkeit

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Benutzerfreundlichkeit der entwickelten Systeme. Die intuitive Benutzeroberfläche und die klar strukturierten Module erleichterten die Bedienung und reduzierten die Einarbeitungszeit für neue Benutzer.

Insgesamt zeigt die Bewertung des vorgeschlagenen Ansatzes, dass trotz einiger Herausforderungen, insbesondere bei der Maschinenanbindung, signifikante Fortschritte erzielt wurden. Die Integration von ML, die flexible Software-Prozesskette und die zuverlässige Sensorik bieten eine solide Grundlage für zukünftige Entwicklungen und Anwendungen in der industriellen Schweißtechnik.

2.18 HAP7 Erprobung, Bewertung, Demonstration und Benchmark | Task 7.5 Benchmarking

Im Rahmen des Projekts wurde ein umfassendes Benchmarking durchgeführt, um die gesamte Prozesskette sowie jeden einzelnen Schritt zu evaluieren. Dies umfasste die Spezifikation der Teile, die Gesamtproduktivität einschließlich der Prozessvorbereitung, die Erfassung von Sensordaten, die Datenaufbereitung, die Modellbewertung, die Datenverarbeitung und das Framework. Die Ergebnisse zeigten, dass der modulare Aufbau der Software eine hohe Anpassungsfähigkeit und Zukunftssicherheit gewährleistet. Die präzise Erfassung der Sensordaten, die effiziente Datenaufbereitung und die zuverlässige Datenverarbeitung bildeten eine solide Grundlage für die Optimierung der Schweißparameter durch ML-Modelle. Insgesamt konnte die Prozesskette erfolgreich bewertet und die Leistungsfähigkeit der einzelnen Schritte bestätigt werden.



3 Notwendigkeit/Angemessenheit der Projektarbeiten

BCT hat die Arbeiten in enger Abstimmung mit dem deutschen Partner ILT und den kanadischen Partnern durchgeführt. Die Bearbeitungs-Tests erfolgten an der beim ILT zur Verfügung stehenden Schweißanlage.

Sowohl der Zugang zu dieser Anlage als auch zu den Anforderungen und den Bauteilen/ Testkörpern der kanadischen Endanwender wäre BCT ohne dieses Projekt verwehrt geblieben. Erst die Kombination der Beiträge der einzelnen Partner hat ein solches Projekt aus Sicht von BCT erst möglich gemacht.

Die Arbeiten wurden bei BCT durch qualifiziertes Personal in gleicher Weise durchgeführt, wie bei Industrie-Projekte oder internen Entwicklungen.

4 Voraussichtlicher Nutzen, Verwertbarkeit der Ergebnisse, Planungen

Durch die direkte Abstimmung der Arbeiten mit den Endanwendern haben die Entwicklungen eine wirtschaftlich technische Relevanz. BCT hat einige der erarbeiteten Lösungen bereits in die Produktpalette integriert, und so den Anwendungsbereich der DED-Bearbeitung erweitert. Die Ergebnisse des Projekts werden auch in die zurzeit in der Entwicklung befindlich neue Softwaregeneration einfließen.

5 Bekannt gewordene Fortschritte anderer Stellen

Während der Entwicklungen sind keine Fortschritte anderen Stellen bekannt geworden, die die Arbeiten von BCT sowie der übrigen Projektpartner oder deren Verwendung beeinflussen oder behindern können.

6 Geplante Veröffentlichungen

BCT plant keine eigenen Veröffentlichungen im Rahmen des Projekts. BCT hat allerdings das ILT bei der Erstellung eines Fachbeitrages unterstützt.

keine eigenen Veröffentlichungen herausgegeben, die Partner bei der Erstellung jedoch unterstützt: „Fraunhofer ILT and partners use Artificial Intelligence and Additive Manufacturing to repair mining tools“ in Metal AM 27.02.2025.