

# **Projektabschlussbericht – Teil II**

## **Abschlussbericht**

**zum Teilvorhaben „Selbstkonfigurierende Strahlquelle und  
Bearbeitungsoptik inkl. OCT als Basis für KI basierte Wissensdatenbank“**

**im Verbundprojekt „KI-basierte Selbstkonfiguration und  
Prozessdatenbankgenerierung für das Laserschweißen (KI-ProLaser)“**

**Zuwendungsempfänger: Laserline GmbH**

**Förderkennzeichen des Teilvorhabens: 13N15391**

**Laufzeit des Vorhabens: 01.03.2021 - 31.08.2024**

## **Inhalt**

1	Kurzdarstellung .....	1
1.1	Aufgabenstellung und Ziele des Teilvorhabens.....	1
1.2	Bezug des Teilvorhabens zu den förderpolitischen Zielen.....	2
2	Aktueller Stand der Technik .....	2
2.1	Der Stand von Wissenschaft und Technik (bezogen auf das Teilvorhaben).....	2
2.2	Neuheit und Attraktivität des Lösungsansatzes.....	3
2.3	Bestehende Schutzrechte (eigene und Dritter).....	3
3	Ausführliche Beschreibung des Teilvorhabens .....	3
3.1	Lösungsweg.....	3
3.2	Arbeitspaket 1: Anforderungen, Schnittstellen und Konzeptionierung .....	4
3.3	Arbeitspaket 2: Entwicklung Gesamtoptiksystem inkl. Bildgebungsverfahren.....	5
3.4	Arbeitspaket 3: Entwicklung IT-Architektur .....	7
3.5	Arbeitspaket 4: Analyse Bildgebungsverfahren .....	8
3.6	Arbeitspaket 5: Aufbau Gesamtprozesskette .....	8
3.7	Arbeitspaket 6: Entwicklung Datenanbindung und Edge Computing .....	9
3.8	Arbeitspaket 7: Datenintegration für KI-Analyse .....	10
3.9	Arbeitspaket 8: KI-Datenanalyse .....	10
3.10	Arbeitspaket 9: Aufbau Wissensdatenbank .....	11
3.11	Arbeitspaket 10: Entwicklung Datenvisualisierung .....	12
3.12	Arbeitspaket 11: Evaluation und Erprobung .....	12
3.13	Arbeitspaket 12: Projektmanagement und Öffentlichkeitsarbeit.....	13
4	Fortschreibung des Verwertungsplans .....	13
4.1	Erfindungen und Schutzrechanmeldungen.....	13
4.2	Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende .....	13
4.3	Wissenschaftliche und technische Erfolgsaussichten nach Projektende .....	13
4.4	Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit .....	13
5	<i>Angaben über die Einhaltung der Ausgaben- und Zeitplanung .....</i>	<i>14</i>

# 1 Kurzdarstellung

## 1.1 Aufgabenstellung und Ziele des Teilvorhabens

Das übergeordnete Ziel des Teilvorhabens ist die Bereitstellung einer selbstkonfigurierenden Strahlquelle und Bearbeitungsoptik inkl. optischer Kohärenztomografie (OCT) als Basis für die KI-basierte Generierung einer Wissensdatenbank. Mithilfe der Selbstkonfiguration sollen Fehlteile und Prozessanlaufzeiten reduziert werden.

Die Verwendung der Prozessdaten dient für nachgelagerte KI-Analysen, um automatisiert und ressourcenschonend Applikationswissen bereitzustellen. Ausgangspunkt für diese Applikationsversuche, in denen Testbauteile nach Kundenanforderungen miteinander gefügt werden, sind im Fall des Laserschweißens Schweißkurven ergänzt mit personenbezogenes Erfahrungswissen. Die statischen und einzeln zu erstellenden Schweißkurven geben Empfehlungen über einzustellende Laserleistung, Vorschubgeschwindigkeit oder Spotgröße. Bisher wird dieses Wissen manuell und mit hohem Zeit- und Materialaufwänden in Testdurchführungen erarbeitet.

Die Applikationsversuche beginnen in der Regel mit dem prototypischen Prozessaufbau, dieser beinhaltet u.a. die Strahlquelle, Lichtleitkabel und Bearbeitungsoptik, ergänzt durch Prozesssensorik sowie Handhabungseinrichtungen.

Für neue Materialpaarungen und Materialstärken sowie spezifische Bauteilgeometrien, Prozessparametern und -einflussgrößen liegen solche praktisch Konfigurationshilfen selten vor.

Um das Ziel der ressourcenschonenden Prozessparametersuche zu erreichen, wird eine Laserstrahlquelle als Edge Computer entwickelt. Hierdurch wird eine Online-Datenverarbeitung im Prozess ermöglicht. Datenströme werden dabei aus einer zu entwickelnden OCT als Bildgebungsverfahren samt Bearbeitungsoptik, der Strahlquelle selbst sowie weiteren Prozessparametern gewonnen und nutzenbringend verarbeitet. Neben der Online-Datenverarbeitung mittels KI-Ansätzen im Edge werden die gewonnenen Prozessdaten offline weiterverarbeitet, dieser Ansatz erlaubt die retrospektive Analyse unter Verwendung von Machine Learning Ansätzen basierend auf Bildgebungs- und Prozessdaten. Hiermit wird das Ziel verfolgt eine Wissensdatenbank für Laserschweißanwendungen aufzubauen.

Grundlagen für diese Ansätze sind die Entwicklung und Integration einer Industrie 4.0-konformen und echtzeitfähigen Kommunikation. Das Teilvorhaben bildet durch die oben aufgeführten Arbeiten die technologischen und informationstechnischen Grundlagen für das Gesamtvorhaben KI-ProLaser und nimmt hierdurch eine zentrale Rolle ein.

Für das Einfahren von Prozessen oder der Bedienung von komplexen Laserschweißprozessen kann diese neue Verbindung von fortschrittlichen Produktionsmitteln und Ansätzen aus der KI einen sehr großen Markt eröffnen. Im Anschluss an das durchgeführte Projekt werden die Erkenntnisse und Lösungen auf weitere Produktreihen und Applikationen erweitert.

Durch die Bearbeitung entstehen folgende Vorteile und Nutzen:

- Starke Reduzierung und Verkürzung von Applikationsversuchen und Einfahrprozessen, was zu ökologischen und ökonomischen Ressourcenschonung beiträgt
- Steigerung der Prozesseffizienz und -qualität im Laserschweißen sowie einer erhöhten Reproduzierbarkeit
- automatisierte Konfiguration von Lasersystemen mit der Folge von weniger Eingreifen in den Prozess und der Reduktion von Stillständen und Fehlteilproduktionen

## 1.2 Bezug des Teilvorhabens zu den förderpolitischen Zielen

Das vorliegende Teilvorhaben umfasst die Entwicklung neuer optischer Systeme, die durch ein ganzheitlich gedachtes Design von der Strahlquelle, über die Optik und Prozesssensorik bis hin zur datenverarbeitenden Algorithmik einen Mehrwert aus den im Licht vorhandenen Informationen erzielt. Dabei erfolgen die Arbeiten wirtschaftlich und anwendungsnah.

Primäres Anwendungsfeld bildet die Produktion, im speziellen die Fertigung unter zu Hilfenahme von Robotern und Lichtstrahlquellen im Bereich der Automobilindustrie, als Forschungsbeispiel.

Ferner beleuchtet das Teilvorhaben neben der Erforschung passender Datenverarbeitungslösungen, die bspw. auf Methoden des maschinellen Lernens basieren, auch Fragestellungen zur Thematik Echtzeitfähigkeit der Systeme.

Durch die hier genannten Arbeiten wird den primären Zielen der Fördermaßnahme „Computer Aided Photonics“ Rechnung getragen. Zusammengefasst werden durch das vorliegende Teilvorhaben das übergeordnete Ziel der Fördermaßnahme „Erforschung, Entwicklung und Implementierung neuer, bildgebender Verfahren und Algorithmen“ stark adressiert. Im Einzelnen werden nachstehende Handlungsfelder des Programms „Photonik Forschung Deutschland“ durch das Teilvorhaben unterstützt:

- 2D/3D-Bilderfassung und Visualisierung durch die Entwicklung und Verwendung von der OCT
- Intelligente (Hardware-nahe) Sensor(daten-)fusion
- Multi-/Hyperspektrale Datenaufnahme. Im Projekt wird als eine zentrale Komponente eine FD-OCT (frequency domain-OCT) verwendet, dies bedeutet, dass die Interferenz der einzelnen spektralen Komponenten erfasst wird.
- Selbstkonfigurierende Systeme, welche im Kern durch die Strahlquelle samt Optikkomponenten realisiert werden.

## 2 **Aktueller Stand der Technik**

### 2.1 Der Stand von Wissenschaft und Technik (bezogen auf das Teilvorhaben)

Die Messung und Qualitätsprüfung von Schweißprozessen durch optische Prüfverfahren mit klassischer Sensorik (2D-Kamera, Laserlichtschnittverfahren) nach dem Schweißen ist heute Stand der Technik. Die OCT-Technologie erlaubt eine optische Inline-Prozessüberwachung. Basierend auf dem interferometrischen Messprinzip kann eine Tiefenmessung des gesamten Fügebereichs während des Schweißprozesses in hoher Genauigkeit erfolgen (Keyhole-Messung). Die Datenauswertung, insbesondere während des Schweißens, verspricht großes Potential, ist aber noch nicht ausgereift. Laserline hatte vor Projektstart im Bereich OCT erste Arbeiten geleistet und konnte hier auf dementsprechendes Grundlagenwissen anknüpfen.

Zum Auslesen von Laser- und Sensordaten kommen heute differente Kommunikationsmöglichkeiten und -protokolle zum Einsatz. In Industrie 4.0 Anwendungen gilt OPC UA als de facto Industriestandard. Ferner finden derzeit Standardisierungsarbeiten für TSN (Time Sensitive Network) statt, zum Projektstart bildet dies eine Basis. Die Zykluszeit von TSN in Kombination mit OPC UA (Pub/Sub) liegt bei < 1ms, was theoretisch auch für den Einsatz in Roboterregelungen geeignet ist.

Stand heute werden Prozessdaten als Grundlage für die Anlageneinrichtung durch Versuche und der Dokumentation in Schweißkurven erstellt. Dies zieht einen enormen Aufwand nach sich. Die Kombination von Kommunikationstechnologien sowie Algorithmen und Ansätze der künstlichen Intelligenz dienen zur automatisierten Erstellung von Prozessdaten. Hierdurch soll der Aufwand von Versuchen enorm reduziert werden. Zusammenfassend ist festzustellen, dass für den Anwendungsfall Laserschweißen mittels Diodenlaser am Markt derzeit keine echtzeitfähigen und KI-basierten Analysemöglichkeiten als Grundlage zur Prozessdatenbankgenerierung verfügbar sind.

## 2.2 Neuheit und Attraktivität des Lösungsansatzes

Zur Erreichung der genannten Nutzensvorteile werden im Teilvorhaben nicht nur Sensordaten, sondern auch verarbeitete Bilddaten (Messdaten) analysiert. Mithilfe einer OCT-Sensorik zur Prozessanalyse sollen Erkenntnisse über Prozessqualität und Verbesserungspotenziale geliefert werden. Mithilfe von KI-Ansätzen wird eine Prozessdatenbank fürs Laserschweißen erstellt. Hier liegt die Neuheit und Attraktivität des Lösungsansatzes in der automatisierten Bereitstellung neuer Datensätze.

Der innovative Kern des vorliegenden Teilvorhabens liegt somit in der Entwicklung eines Gesamtoptiksystems, der erforderlichen Schnittstellen und der echtzeitfähigen Datenverarbeitung bis hin zu einer Wissensdatenbank für Prozessdatensätze.

Neben den hier skizzierten technischen Vorteilen liegt die Attraktivität des Teilvorhabens in den wirtschaftlichen Nutzenpotentialen begründet. Hierzu zählen allen voran die Reduktion von durchzuführenden Versuchen zur Parametrierung von Prozessdatensätzen sowie die Reduktion von Ausschuss durch die Selbstkonfiguration des Lasersystems.

Für einen industriell einsetzbaren KI-basierten Laserschweißprozess werden im Rahmen des Teilvorhabens grundlegende Erfahrungen und Anforderungen für ein darauf aufbauendes Produkt bzw. neue Services gewonnen. Neben der Bereitstellung eines Bildgebungsverfahrens (OCT) zur Erweiterung der Produktpalette sind hier die Überlegungen zum Vertrieb von Prozessdatensätzen hervorzuheben.

Mit der Entwicklung eines selbstkonfigurierenden Lasersystems samt Bearbeitungsoptik und OCT sowie der Bereitstellung einer Wissensdatenbank für Prozessdatensätze wird Laserline aus heutiger Sicht weltweit eine Spitzenposition bei derartigen Lösungen einnehmen.

## 2.3 Bestehende Schutzrechte (eigene und Dritter)

Eine Einschränkung der kommerziellen Verwertung der erreichten Resultate durch Schutzrechte Dritter ist zurzeit nicht absehbar.

## **3 Ausführliche Beschreibung des Teilvorhabens**

Da die Arbeitspakete und Unterarbeitspakete in vielen Fällen von mehreren oder sogar allen Projektpartnern bearbeitet wurden, wird innerhalb des Berichtes zu weiten Teilen auf eine Untergliederung in UAPs verzichtet. Darüber hinaus ist eine scharfe Trennung der Zugehörigkeit der Ergebnisse nicht immer möglich.

### 3.1 Lösungsweg

Laserline arbeitet in allen AP (außer AP 3.2) aktiv mit.

Der Lösungsweg folgt dabei dem Vorgehensmodell nach VDI 2206, der Entwicklung mechatronischer Systeme. Beginnend mit der Anforderungsdefinition, gefolgt vom Systementwurf und den domänenspezifischen Entwürfen, bis hin zur Systemintegration mit dem Ergebnis eines (prototypischen) Produkts, unter ständiger iterativer Eigenschaftsabsicherung der einzelnen Arbeitsschritte.

Konkret auf das Vorhaben bezogen, erarbeiten die Projektpartner einen gemeinsamen Anwendungsfall, welcher als Modellprozess dient und entsprechende Prozessrahmenbedingungen definiert.

Laserline wird anschließend das OCT-Messsystem entwickeln und mit der Bearbeitungsoptik in die Gesamtprozesskette integrieren. Anhand der gewonnenen Messdaten kann dann ein KI-unterstütztes Modell zu Vorhersage von Prozessergebnissen erstellt werden. Dieses wird in der Folge anhand weiterer Schweißversuche evaluiert und weiterentwickelt.

Final soll mithilfe der Gesamtprozesskette inkl. Prozesssensorik und KI-Modell die echtzeitfähige Feedback-Schleife erprobt werden, bei der auch die Wissensdatenbank mit den erzielten Prozessergebnissen gefüllt wird.

### 3.2 Arbeitspaket 1: Anforderungen, Schnittstellen und Konzeptionierung

Innerhalb des Arbeitspaketes wurde sich zunächst im Konsortium ausgetauscht, was ein möglicher Anwendungsfall (UAP 1.1) ist, anhand dem innerhalb des Projektes die Ergebnisse erzeugt werden können.

Als Ergebnis wurde eine Schweißanwendung für Batteriemodulgehäuse in der Automobilindustrie gewählt. Die dabei typischerweise verwendeten Werkstoffe wurden in weiteren Projektverlauf als Materialkombinationen genutzt, um den KI-Algorithmus auf verschiedene Materialkombinationen zu trainieren.

Neben dem Anwendungsfall wurde auch die Bearbeitungsoptik (siehe Abb. 1) spezifiziert. Hierbei wurden neben den üblichen Merkmalen wie etwa Leistungsfähigkeit, Arbeitsabstand und Spotform- und -größe auch die wesentlichen Schnittstellen zur Sensorik definiert, welche im Projekt genutzt wird. Demzufolge dienen die Ergebnisse dieses UAP 1.2 als Basis für den weiteren Projektverlauf.

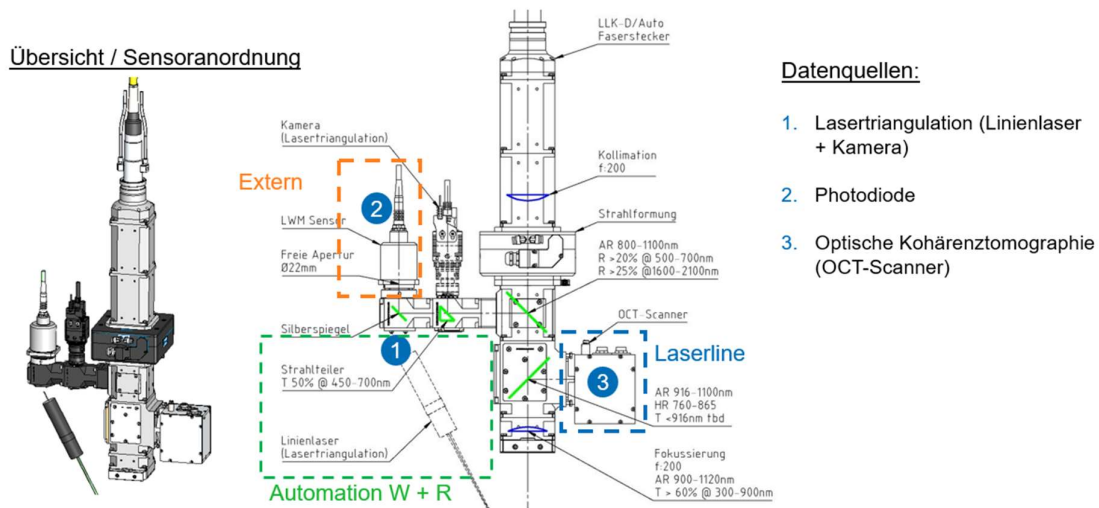


Abbildung 1: Bearbeitungsoptik inkl. Übersicht der Sensoranordnungen

Weiteres Ergebnis des APs war neben dem Konzept zur Erzeugung der Daten auch die erste Konzeptionierung des Datentransfers. Hier wurde eine Wertstromanalyse der Partner Laserline, Automation W+R und Audi durchgeführt (Abb. 2), welche die Basis der IT-Infrastruktur und Kommunikationsgrundlage bildete.

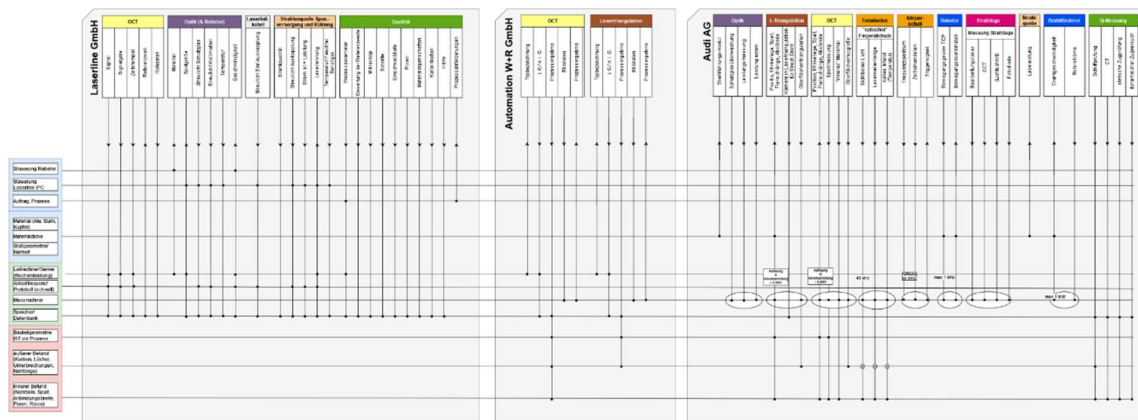


Abbildung 2: Wertstromanalyse

Als Teil des UAP 1.5 wurden noch Augmented bzw. Virtual Reality Anwendungen und deren möglichen Nutzen innerhalb des Projektes bewertet. Hier wurde bei keinem Partner ein

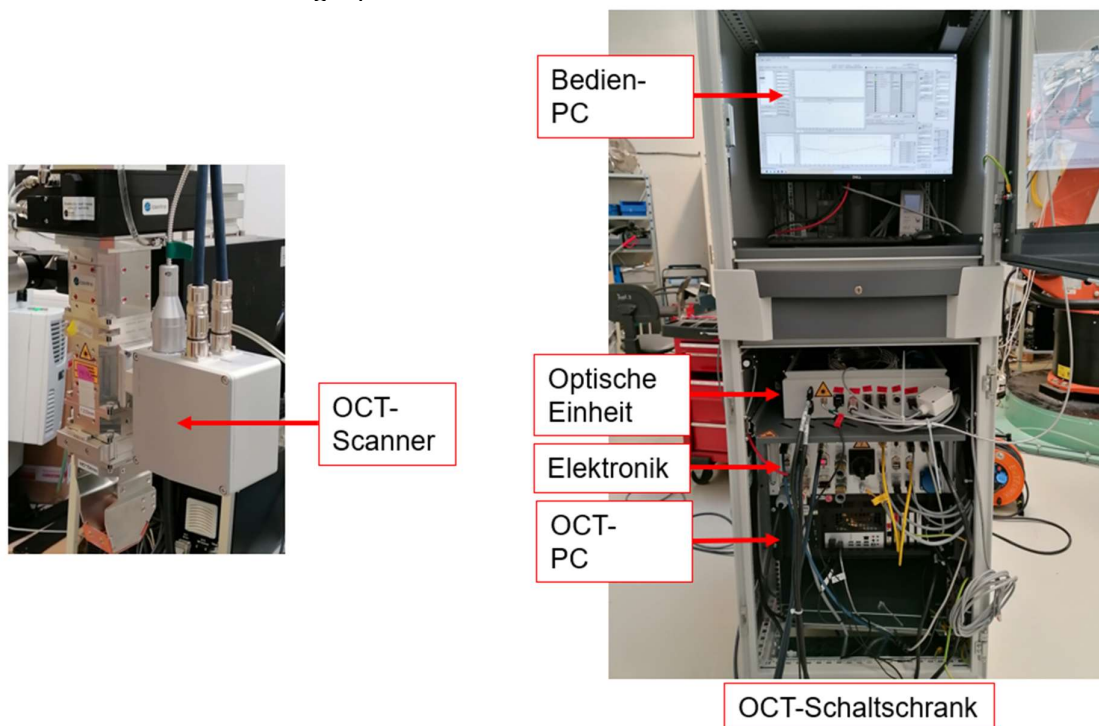
Mehrwert erwartet und die Anwendungen somit im weiteren Projektverlauf nicht mehr betrachtet.

### 3.3 Arbeitspaket 2: Entwicklung Gesamtoptiksystem inkl. Bildgebungsverfahren

Im Arbeitspaket 2 wurden auf Seiten Laserline die größten technischen Projektergebnisse erzielt, da es hier um die Entwicklung, Erprobung und Optimierung des OCT-Systems ging. Vor Projektbeginn hatte Laserline bereits grundlegende Kenntnisse zur Funktionsweise der optischer Kohärenztomografie (OCT). Das bestehende Funktionsmuster war jedoch nicht für den Einsatz in einem industriellen Umfeld geeignet.

So galt es das OCT zum einen in der Technik weiterzuentwickeln und zum anderen in ein robustes System zu wandeln, was neben der reinen Messfähigkeit auch eine Benutzernutzbarkeit aufweisen soll. Als nicht-technische Herausforderung stellt sich zu Projektbeginn die Verfügbarkeit diverser Bauteile dar. Vor dem Hintergrund der Auswirkungen der Covid-19-Pandemie verzögerte sich in der Entwicklungsphase die Beschaffung wesentlich.

Als Ergebnis wurde ein modulares OCT-Sensorsystem entwickelt, welches zur Messung der Nahttiefe während des Prozesses geeignet ist. Die Modularität bezieht sich in dem Falle auf die einzelnen Subsysteme, welche auf 19-Zoll Basis in einem gemeinsamen Schaltschrank platziert sind. Konkret handelt es sich um einen Bedien-PC, einen OCT-Prozess-PC, einem Elektronik-Abteil und einem Optik-Abteil. Ergänzt wird das ganze durch einen Scanner, welcher an der Bearbeitungsoptik montiert ist.



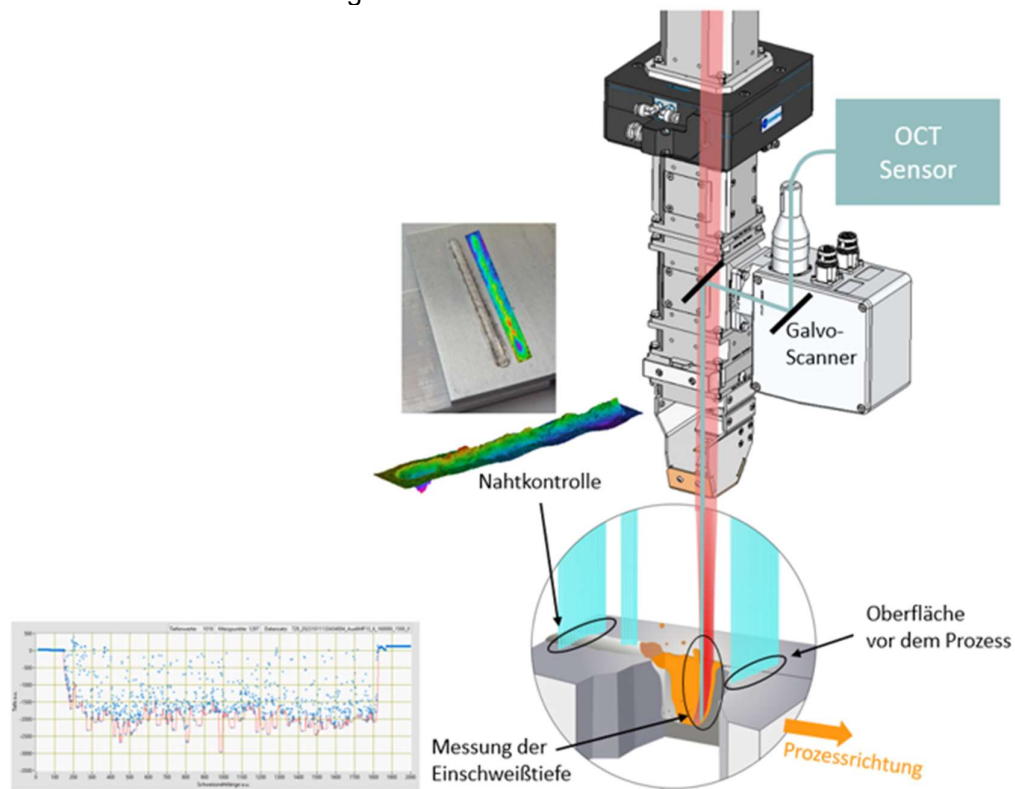
**Abbildung 3: Aufbau des OCT-Messsystems**

Mit der Sensorik war es möglich die Schweißnaht an drei Stellen (siehe Abbildung 4) zu charakterisieren und entsprechenden Nutzen daraus zu gewinnen.

Mit der Vermessung der Bauteiloberfläche vor dem Schweißprozess lässt sich die Nut erfassen und die Informationen so für eine Positionsregelung nutzen. Diese Funktion wurde im Projekt nur theoretisch betrachtet.

Bei der nachlaufenden Messung kann das OCT die geschweißte Naht digital abbilden. Hieraus lassen sich 3D-Profile ableiten und Problemstellen anhand der Oberfläche nachweisen. Im Projekt wurde hier eine große Vergleichbarkeit zur Lasertriangulation festgestellt.

Die Innovation des OCTs liegt jedoch in der Keyhole-Messung während des aktiven Schweißprozesses. Hiermit ist es möglich eine Messung der Einschweißtiefe darzustellen, wie sie es kein anderer Sensor möglich macht.



**Abbildung 4: Verschiedene Messpositionen des OCT-Sensors**

Als Erfolge lassen sich die Ergebnisse verzeichnen, welche man, während der verschiedenen praxisorientierten Versuche erzielen konnte. Mithilfe der nachlaufenden Nahtkontrolle konnte die Schweißnaht erfolgreich digitalisiert werden und so ein identisches Ergebnis zum Lasertriangulationssensor erzielt werden (vgl. AP4).

Aufgrund dieser vergleichbaren Ergebnisse zur Lasertriangulation, wurde sich allem auf die Messung im Keyhole fokussiert und hier intensive Entwicklungsarbeit geleistet, da diese Messfunktion als einzigartiges Merkmal identifiziert wurde. So wurden Algorithmen entwickelt, welche zunächst die Position des Keyholes suchen, um in der Folge die Messpunktdichte am relevanten Ort zu erhöhen. Mithilfe der Keyhole-Messung konnten dann bemerkenswerte Ergebnisse erzielt werden.

So kam es im Rahmen von Schweißversuchen zu unerwarteten Abweichungen in der Materialqualität der Schweißproben. Resultierend wurden schlechte Anbindungen erzielt, welche sich zum einen in der Zugkraft als gewähltes Qualitätslabel widerspiegelt. In den Messdaten des OCTs konnte die geringe Einschweißtiefe eindeutig nachgewiesen werden. So kann das OCT in diesem Fall zu Bewertung der Nahtgüte eingesetzt werden.

Ein weiteres großes Arbeitspaket in dem Umfeld der OCT-Entwicklung war die Entwicklung einer Visualisierungslösung, mit der die Messungen und Messdaten benutzerfreundlich angezeigt werden können. Hier wurde innerhalb des Projektes eine Bedienoberfläche geschaffen, mit der sich die Messdaten der OCT visualisieren lassen. Neben der reinen Anzeige der Messdaten sind auch Softwarefeatures enthalten, welche eine Filterung der Daten vornehmen oder die Schweißgeometrie berücksichtigen. So kann die Dicke der Fügepartner angegeben werden, woraus sich mit dem Messergebnis der Einschweißtiefe eine Einschweißkurve anzeigen lässt. Hieraus kann wiederum die ermittelte maximale Einschweißtiefe abgelesen werden (siehe Abb. 5).

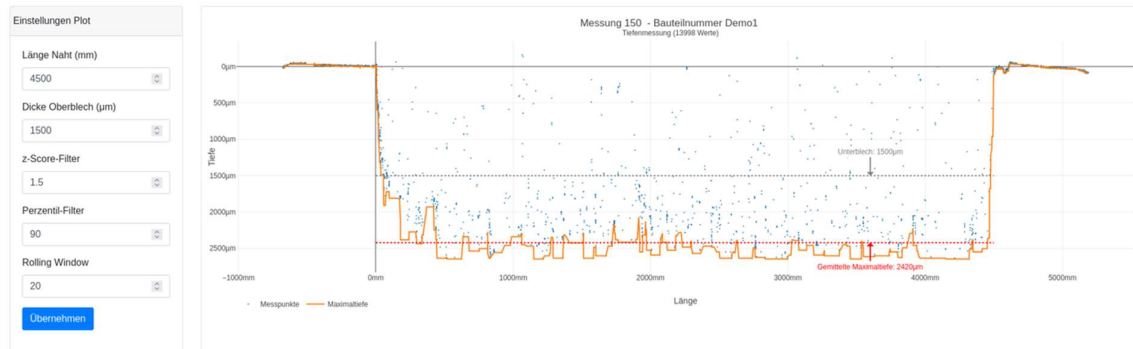


Abbildung 5: Ansicht der Benutzeroberfläche inkl. der Berechnung zur maximalen Einschweißtiefe

Um auch die anderen UAPs des Arbeitspaketes zu bearbeiten wurde die Lasertriangulation an der Halterung der Bearbeitungsoptik zum Roboter adaptiert. Hinzu kommt die Integration aller Teilnehmer in ein gemeinsames Netz aus PROFINET-Netzwerk integriert, um die Ansteuerung der Sensoren für die Erfassung der Daten zu synchronisieren.

### 3.4 Arbeitspaket 3: Entwicklung IT-Architektur

Während der Arbeiten an Arbeitspaket 3 stand Laserline ständig im Austausch mit den Projektpartnern, um eine geeignete Lösung für die IT-Architektur zu entwickeln. Entgegen dem ursprünglichen Antrag hat mich sich gegen eine OPC UA Kommunikation entschieden. Der Datenaustausch erfolgte mittels MQTT-Protokoll. Der Grund liegt hier in der Integrationsfähigkeit des Protokolls auf allen Teilnehmern der Kommunikationskette. Neben dem Austausch der Daten wurde auch eine Steuerung des Prozesses via PROFINET eingerichtet.

Hierbei sammelte ein sogenannter MQTT-Broker alle Datenpakete der Sensoren ein und stellte diese einem Master zur Verfügung, welcher letztlich als Schnittstelle zur Cloud fungiert, auf der die KI-Auswertung des Prozesses abläuft.

Die Weiterentwicklung dieses Ansatzes erfolgte dann in AP6 hin zu einer Edge-Infrastruktur.

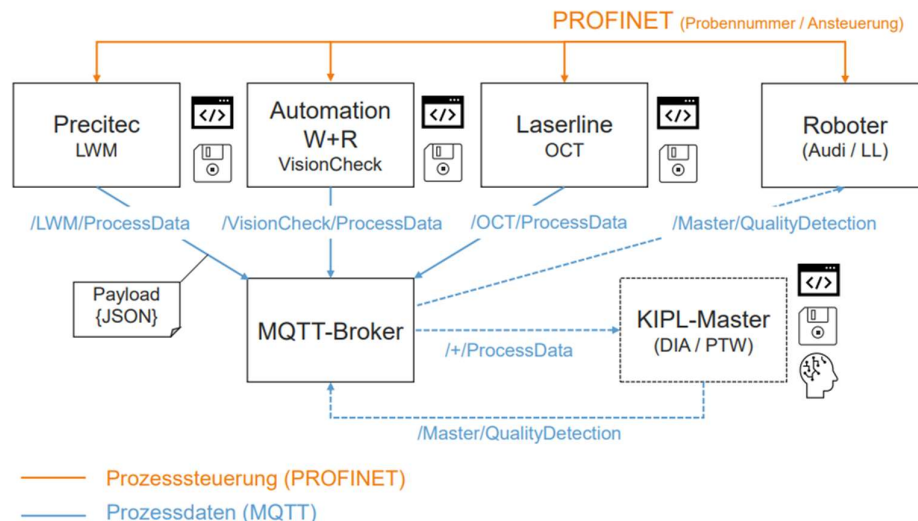


Abbildung 6: Schematische Darstellung der Datenarchitektur

### 3.5 Arbeitspaket 4: Analyse Bildgebungsverfahren

Nachdem die Lasertriangulation an der Bearbeitungsoptik adaptiert wurde, konnten Daten zur Bewertung der Oberflächeneigenschaften erzeugt werden.

Mithilfe einer Software zur Detektion von Fehlstellen, konnte ein Zusammenhang zwischen Sensordaten und Schweißnahtgüte hergestellt werden. Hier wurden Nahtbreite, Aufwölbung und Nahteinfall als Kenngrößen genutzt, um die Naht zu bewerten.

Während der Praxisversuche wurde die Naht zudem mithilfe einer Zugkraft auf ihre Festigkeit hin geprüft. Die Messwerte lieferten hier jeweils einen Zusammenhang zwischen Messwert und Zugkräftigkeit, sodass die Eignung der Lasertriangulation zur oberflächlichen Bewertung einer Schweißnaht festgestellt werden konnte.

Als zusätzlicher Arbeitspunkt wurde die Verwertbarkeit der OCT-Oberflächendaten in der Auswertesoftware von Automation W+R geprüft. Anhand der positiven Ergebnisse zur Darstellbarkeit der OCT-Oberflächendaten, konnte eine Redundanz der Messsysteme festgestellt werden.

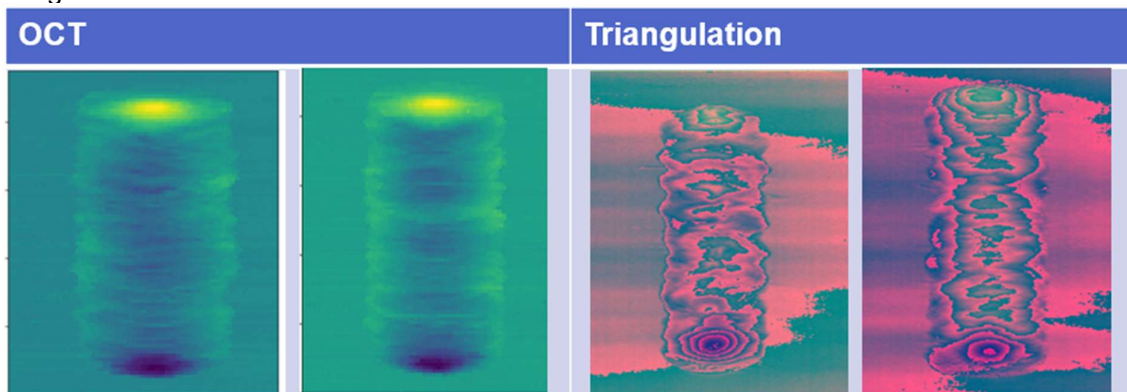


Abbildung 7: Vergleich der Bilddaten, welche mit OCT und Triangulation aufgenommen wurden

Da der Vergleich von OCT-Oberflächendaten und Lasertriangulation dazu führte, dass kein Mehrwert in der Messung der Oberfläche mit dem OCT gesehen wurde, sollte die OCT neue Messdaten bereitstellen. Hieraus folgte, wie in AP 2 bereits erwähnt, die Fokussierung der Entwicklung hin zu einem Schweißtiefsensor.

### 3.6 Arbeitspaket 5: Aufbau Gesamtprozesskette

Während dieses Arbeitspaketes wurde der gesamte Aufbau der Prozesskette realisiert. Um innerhalb des Projektes flexibel und parallel arbeiten zu können, wurde sowohl bei Audi in Ingolstadt als auch bei Laserline in Mülheim-Kärlich ein kompletter Aufbau umgesetzt.

Das Arbeitspaket wurde inhaltlich zudem genutzt, um die Sensordaten zu erzeugen, welche in der frühen Phase des Projektes genutzt wurden um ein KI-Modell zu entwickeln. Im weiteren Verlauf wurden mehrfach Versuche an den beiden Standorten durchgeführt, welche in der Folge genutzt wurden, um das Modell zu evaluieren und zu optimieren.

Angelehnt an das Arbeitspaket 1 wurden 3 verschiedene Materialdickenkombinationen definiert, welche sich sowohl im Obermaterial als auch in der Dicke unterscheiden. Weiterhin wurde eine einheitliche Geometrie der Proben und der Schweißnaht (I-Stoß mit 35 mm Länge) definiert.

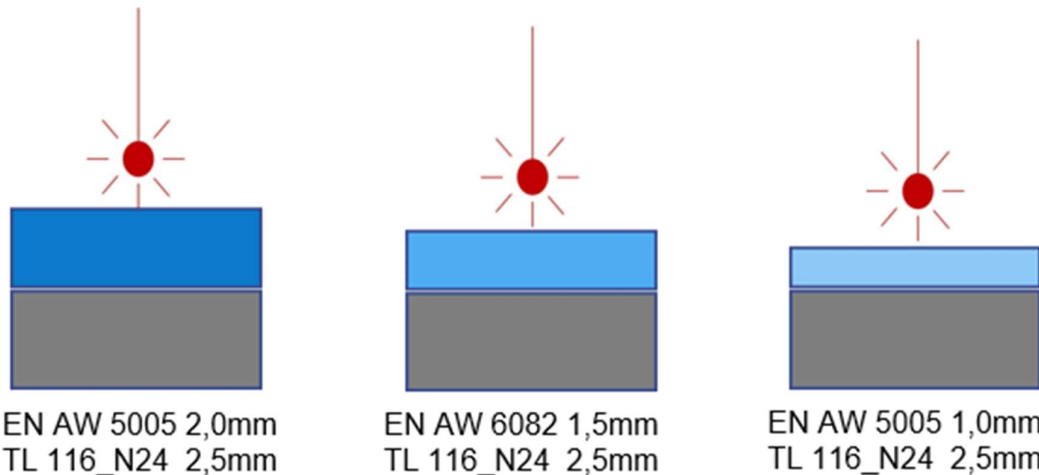


Abbildung 8: Schematische Darstellung der drei Materialkombinationen inkl. Dicken und Materialkennung

Um eine systematische Datenerfassung zu gewährleisten, wurde eine Prozessmatrix entwickelt, bei der die Parameter Laserleistung, Spalt und Fokusslage systematisch variiert wurden. Mithilfe der Prozessmatrix wurden so je Materialkombination ca. 150 Datensätze erzeugt, welche zum Training der KI genutzt wurden. Als Qualitätslabel für die Güte der Schweißnaht wurden Zugversuche durchgeführt und anhand der resultierenden Kraft eine Aussage über die Güte der Schweißung getroffen.

Um die Gesamtprozesskette zu Vervollständigen und auch den Datentransfer in Echtzeit zu ermöglichen, ist eine uneingeschränkte Kommunikation der Prozessteilnehmer untereinander nötig. Da es bei Audi in den Konzernrichtlinien Einschränkungen bezüglich dieser Kommunikationsfreiheit gibt, wurden die finale Demonstration der Gesamtprozesskette nur am Standort bei Laserline durchgeführt. Auch mit Blick auf die anderen Arbeitspakete konnte beim Projektabschlussstreffen eine erfolgreiche und vollständige Abfolge des Schweißprozesses, inkl. Datensammlung und -verarbeitung, bis hin zur KI-Bewertung und Dokumentation der Ergebnisse in der Wissensdatenbank umgesetzt werden.

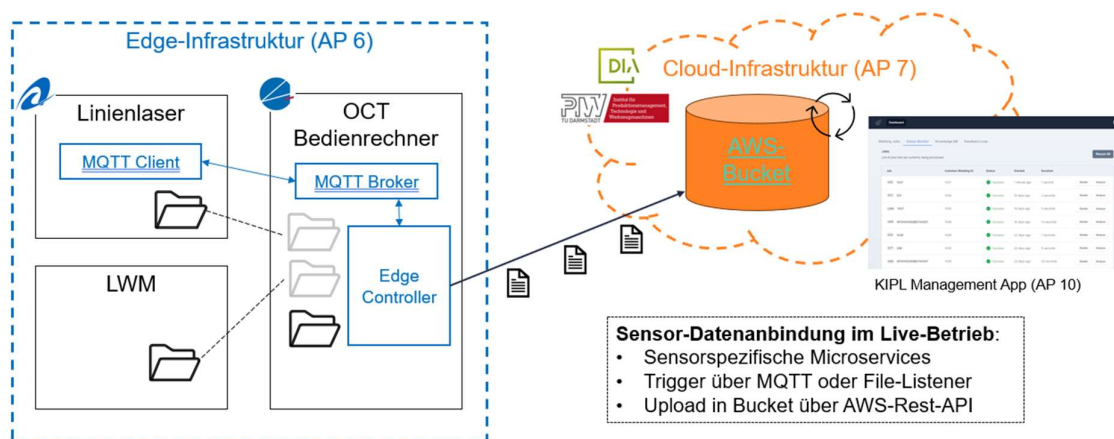
### 3.7 Arbeitspaket 6: Entwicklung Datenanbindung und Edge Computing

Innerhalb der Projektlaufzeit wurde eine Anbindung des Bearbeitungslaser und des Roboters in der Bearbeitungszelle via OPC UA hergestellt. Hierüber war es möglich einen Informationsaustausch in eine webbasierte Anwendung zu demonstrieren. Durch diesen Kommunikationskanal war es möglich Informationen über den Zustand des Lasers (z.B. Laserleistung) und des Roboters (z.B. Lage des Bearbeitungspunktes) zu erhalten.

Da sich die anderen Sensoren nicht oder nur sehr schwer in dieses OPC UA Netzwerk einbinden lies und die erhaltenen Informationen über die Bewegungsdaten des Roboters für die Daten keine Relevanz haben (Die Bewegungsgeschwindigkeit wurde konstant gehalten), wurde von einer OPC UA basierendem Kommunikationsstruktur abgesehen.

Wie bereits in vorherigen Arbeitspaketen erwähnt, wurde die Datenkommunikation folglich mithilfe von MQTT-Protokollen realisiert. Hierbei wurde der Bedienrechner des OCTs zu einem zentralen Element, welcher als MQTT-Broker fungiert und somit das Edge Computing darstellt. Der Broker sammelt die Daten der Sensoren und bildet die Schnittstelle zur Cloud-Infrastruktur, in der ein AWS-Bucket liegt.

Neben dieser Datenanbindungsstruktur gibt es eine prozesseitige Steuerung der Sensoren. Mithilfe eines PROFINET Netzwerkes werden Steuersignale zwischen dem Roboter als Leitreechner, den Sensoren und dem Edge Computer ausgetauscht. Die Steuerung wird genutzt, um den Start der Datenerfassung zu synchronisieren und Informationen wie Bauteil-ID und Zeitstempel auszutauschen.



**Abbildung 9: Visualisierung der Datenanbindung inkl. Edge-Computing**

In der Cloud treffen in der Folge Sensordaten und KI-Algorithmus (AP 7) aufeinander. Mit einer entsprechenden Visualisierung der Daten (AP 10) in einer Management Applikation und der angrenzenden Wissensdatenbank entsteht so ein komplette Dateninfrastruktur.

### 3.8 Arbeitspaket 7: Datenintegration für KI-Analyse

Innerhalb des Arbeitspaketes arbeite der Projektpartner PTW an der Erstellung eines KI-Algorithmus, welcher mit den Daten aus den verschiedenen Sensoren angeleitet und trainiert wird.

Da Laserline mit der Entwicklung des OCTs eine neue Technologie inkl. neuem Datenformat in das Projekt einbringt, wurde hier ein detaillierter Austausch zwischen den Projektpartnern gehalten. Hier ging es um die Interpretation der übergebenen Messdatensätze. Des Weiteren fanden auch Abstimmungen statt, ob es eine Vorverarbeitung der Datensätze direkt nach der Messung sinnvoll ist, wie dieser aussehen könnten oder ob die Bereitstellung eines unverarbeiteter Datensatzes zielführender ist. Final entschied man sich eine vorverarbeitete Version mit bereits vorgefilterten Rohdaten zu nutzen und so die Rechenleistung lokal am OCT-Bedienrechner zu nutzen und die KI-Bewertung einfacher zu gestalten.

### 3.9 Arbeitspaket 8: KI-Datenanalyse

Nachdem in AP 7 ein erstes Modell zur KI-Datenanalyse entwickelt wurde, wurde dieses über die gesamte Projektlaufzeit weiterentwickelt.

So wurden zunächst nur die Oberflächendaten der OCT mit ausgewertet und im späteren Projektverlauf durch die Tiefeninformationen erweitert.

Laserline stellt im Laufe der Zeit weitere Datensätze zur Verfügung, um die Detailtiefe des Modells zu vergrößern und analysierte gleichzeitig die Schweißproben anhand des vorhandenen Expertenwissens. Durch die Verknüpfung von Expertenwissen und Sensordaten konnte das Modell weiter verbessert werden.

In der finalen Phase des Projektes konnte das Modell dann genutzt werden um Anhand von realen Messergebnissen und der Angabe der aktuellen Versuchsparameter, bestehend aus Laserleistung, Fokusslage und Spaltbreite, einen optimierten Parametersatz vorzuschlagen. Dieses Vorschlagwesen für einen optimierten Parametersatz ist durch die Einbettung in der Cloud und die Anbindung an das Edge Computing in der Lage den Parametersatz direkt nach der durchgeführten Schweißung bereitzustellen.

Wird bei der Analyse der Sensordaten eine schlechte Qualität berechnet, ist es so möglich die nachfolgende Schweißung mit einem optimierten Parametersatz durchzuführen. Im Sinne der Nachhaltigkeit ist es somit möglich die Anzahl der fehlerhaft produzierten Bauteile auf ein kleines Maß zu reduzieren und die Qualität instantan zu steigern.

Für die Einrichtung eines Schweißprozesses konnte das KI-Modell umgekehrt genutzt werden, um eine Vorhersage zur erwarteten Zugkraft zu treffen, indem allein die Versuchsparameter eingestellt wurden.

### 3.10 Arbeitspaket 9: Aufbau Wissensdatenbank

Um das gewonnene Wissen und die erzeugten Daten langfristig zu speichern wurde eine Wissensdatenbank entwickelt.

Die erzielten Ergebnisse der Versuchsdurchführung werden zusammen mit den Versuchsparametern nach der Schweißung zu einem Datensatz zusammengefasst und in die Wissensdatenbank geschrieben. So wird jeder durchgeführte Schweißversuch als einzelner Datensatz zentral dokumentiert.

Als Tool um die KI-Vorhersagen und die tatsächlich durchgeführten Messpunkte zu visualisieren wurde eine Quality-Map gewählt. Diese Quality-Map (vgl. Abbildung 10) enthält eine dreidimensionale Darstellung für die erwarteten Schweißergebnisse. Gestützt durch die Farbgebung, kann ein Parameterraum aus der Grafik entnommen werden, für den eine hohe Zugkraft erwartet wird. Durch den Blick auf die leicht einstellbaren Prozessparameter wurden die Achsen der Darstellung gewählt. Sind Materialkombination und Spalt meist durch den Anwendungsfall definiert, lassen sich Laserleistung und Fokusposition durch die Steuerung des Lasers oder des Roboters leicht ändern.

Durch die roten Markierungen werden die real durchgeführten Schweißversuche visualisiert. Anhand der Visualisierungsart lassen sie intuitiv Startparameter für neue Schweißanwendungen finden, mit denen eine Prozessentwicklung schneller und ressourcenschonend erfolgen kann.

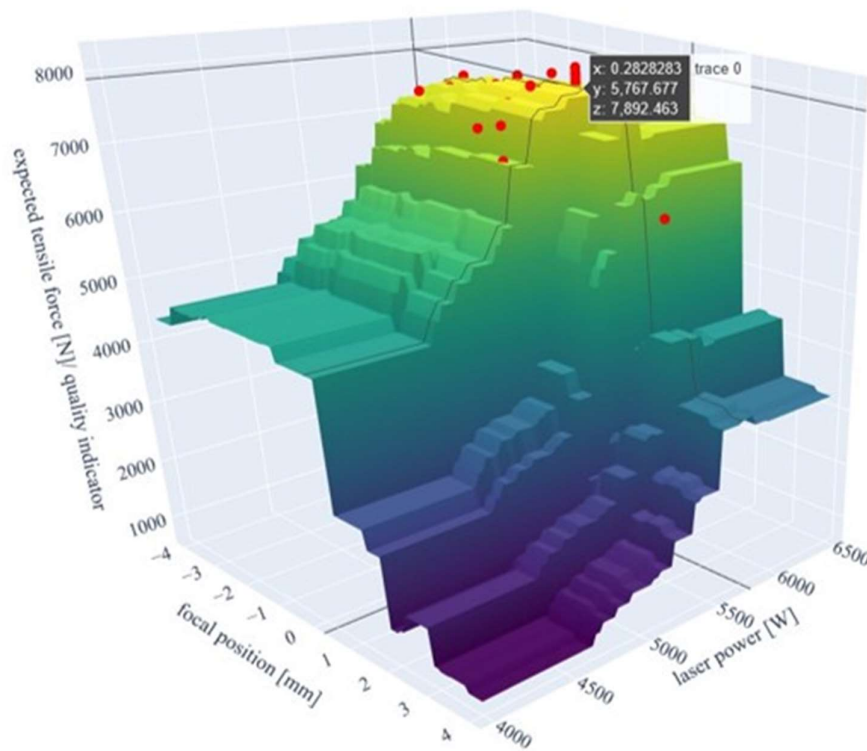


Abbildung 10: Beispiel einer Quality-Map für ein Materialkombination

### 3.11 Arbeitspaket 10: Entwicklung Datenvisualisierung

Die Datenvisualisierung ist eng mit der Wissensdatenbank (AP9), der KI-Analyse (AP8) und der Datenanbindung (AP6) verknüpft und bindet die Ergebnisse in einer speziell entwickelten Management App ein.

The screenshot shows a web application interface for welding jobs. At the top, there are navigation tabs: 'Welding Jobs', 'Status Monitor', 'Knowledge DB', and 'Feedback Loop'. Below the tabs, the user 'Doe' is logged in, and a 'New Welding' button is present. The main content is a table titled 'List of Weldings (DOE) that has been processed.' The table has the following columns: Experiment Id, Created, Power, Focal Position, Gap, Material Variant, Tensile Force, and Label. The 'Label' column contains status indicators: a green checkmark for 'OK' and a red 'X' for 'NOK'. Each row also has three buttons: 'Edit', 'Analyze', and 'Overview'. The table shows 10 rows of data, with the first row (Experiment Id 1437) being 'OK' and the others being 'NOK'. At the bottom of the table, it says 'Showing 1 to 10 of 382 results' and there are 'Previous' and 'Next' navigation buttons.

Experiment Id	Created	Power	Focal Position	Gap	Material Variant	Tensile Force	Label			
1437	4 days ago	5800.00	2.30	200.00	2	7000.00	OK	Edit	Analyze	Overview
1436	11 days ago	5800.00	2.30	200.00	2		NOK	Edit	Analyze	Overview
1435	12 days ago	5800.00	2.30	200.00	2		NOK	Edit	Analyze	Overview
1434	12 days ago	5800.00	2.40	200.00	2		NOK	Edit	Analyze	Overview
1433	20 days ago	5800.00	2.40	200.00	2	6040.00	OK	Edit	Analyze	Overview
1432	20 days ago	5700.00	2.40	0.00	2	6320.00	OK	Edit	Analyze	Overview
1431	20 days ago	5700.00	1.20	0.00	2	8090.00	OK	Edit	Analyze	Overview
1429	20 days ago	5800.00	1.20	600.00	2	7490.00	OK	Edit	Analyze	Overview
1427	20 days ago	5800.00	1.20	300.00	2	8460.00	OK	Edit	Analyze	Overview
1426	20 days ago	5800.00	1.20	0.00	2	7840.00	OK	Edit	Analyze	Overview

**Abbildung 11: Visualisierung der durchgeführten Schweißungen in der Management App**

Die Idee hinter dieser Visualisierungsart war es dem Prozessverantwortlichen einen Überblick über die aktuelle Qualität in der Produktion zu ermöglichen. So werden die einzelnen Schweißungen in der obersten Ebene dargestellt und mit einem einfachen Label (gute oder schlechte Qualität) versehen. Für den tieferen Blick in eine Schweißung sind die einzelnen Messdaten verknüpft. Hier wird ebenfalls die Bewertung der Sensordaten durch die KI einsehbar, sodass auch die Analyse durch die Prozessintelligenz für das Management oder den Werker sichtbar wird.

Lässt sich anhand der Prozessdaten ein Trend zu schlechter werdender Qualität erkennen, kann der Werker eingreifen und auf die Optimierungsvorschläge der KI-Analyse zurückgreifen. Neben dem Zugriff auf historische Daten lässt sich auch die aus AP9 bekannte Quality Map in der Anwendung wiederfinden. Durch die Einbindung in eine Cloud-Umgebung lässt sich zudem ein Zugriff über einen Browser von verschiedenen Geräten ermöglichen.

### 3.12 Arbeitspaket 11: Evaluation und Erprobung

Die Verantwortlichkeit dieses Arbeitspaketes liegt beim Partner Audi. In Abstimmung mit Audi fand zum Projektende eine Bewertung statt, ob die OCT-Technologie einen Mehrwert im produktiven Bereich des gewählten Anwendungsbeispiels nutzbar ist.

Hier wurde im Sinne des Verwertungsplanes eine grundsätzliche Eignung für eine In-Prozess-Regelung festgestellt. Eine konkrete Umsetzung wurde jedoch für die nächsten Jahre vorerst aus wirtschaftlichen Gründen ausgeschlossen.

Dennoch hat Audi durch Versuche am eigenen Standort und bei Versuchen am Standort bei Laserline die Projektinhalte und -ergebnisse vorlaufend evaluiert.

Laserline hat durch die eingehende Schulung in das OCT-System dazu beigetragen, dass die Technologie angewendet werden kann und die Bedienung gewährleistet werden konnte. Somit wurde die Basis geschaffen, um eine selbstständige Erprobung der Ergebnisse durch den Projektpartner zu ermöglichen.

### 3.13 Arbeitspaket 12: Projektmanagement und Öffentlichkeitsarbeit

Die Ergebnisse des Arbeitspaketes für das Projektmanagement lassen sich nur in sekundären Ergebnissen beschreiben. So wurde durch regelmäßige Abstimmungstermin im Konsortium die Kommunikation aufrechterhalten, Anforderungsmanagement unterhalb der Projektpartner organisiert und Teilergebnisse herbeigeführt.

Die erfolgreiche Durchführung der Abschlussversuche am Tag des Projektabschlusstreffens ist das Ergebnis eines kontinuierlichen und strukturierten Projektmanagements über die gesamte Projektlaufzeit hinweg.

Im Bereich der Öffentlichkeitsarbeit war vor allem das PTW aktiv. So wurden die Zwischenergebnisse beispielsweise auf der 17. Und 18. CIRP Conference in 2023 und 2024 vorgestellt.

## **4 Fortschreibung des Verwertungsplans**

### 4.1 Erfindungen und Schutzrechanmeldungen

Bislang wurden von Laserline im Rahmen des Vorhabens keine Erfindungen gemacht oder Schutzrechte Dritter beansprucht.

### 4.2 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende

Durch die Kombination aus OCT-Messsystems, welches die Nahttiefe eines Schweißprozesses während der Bearbeitung misst und der zeitgleichen Datenverarbeitung der Prozessergebnisse, konnte ein System demonstriert werden, welches einen Zusammenhang zwischen Prozessdaten und der Güte der Schweißnaht hergestellt kann. Durch diese Kombination lassen sich Schweißprozesse wirtschaftlicher gestalten, indem die Prozessergebnisse qualitativ während der Bearbeitung bewertet werden.

Durch die Kooperation mit dem Projektpartner Audi wurde eine Umsetzbarkeit im Automobilen Umfeld diskutiert. Laserline erhofft sich innerhalb der nächsten 5 Jahre erste Produktionsanlagen mit OCT-Technologie auszustatten.

### 4.3 Wissenschaftliche und technische Erfolgsaussichten nach Projektende

Gegenüber dem Antrag haben sich keine Änderungen ergeben.

### 4.4 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Durch das entwickelte OCT-Messsystem und die KI-basierte Wissensdatenbank ist es möglich die Projektergebnisse, welche für drei verschiedene Materialkombinationen entwickelt wurden, auf andere Materialien zu übertragen.

Hierdurch ergeben sich verkürzte Anlaufzeiten für Produktionsprozesse, da die Wissensdatenbank in der Lage ist einen guten Startpunkt für die Prozessentwicklung zu liefern.

Da das OCT nicht nur in der Lage ist die Nahttiefe im Prozess zu vermessen, sondern auch die Nahtgeometrie zu vermessen, können auch andere Anwendungsbereiche wie Auftragsschweißen von den Projektergebnisse profitieren.

## **5 Angaben über die Einhaltung der Ausgaben- und Zeitplanung**

Das Vorhaben wurde konnte nicht wie ursprünglich beantragt abgeschlossen werden. Hierfür wurde eine sechsmonatige, kostenneutrale Verlängerung von allen Projektpartnern beantragt.

Ursächlich für die Verzögerung war die schlechte Materialverfügbarkeit einzelner Bauelemente für die Entwicklung des OCT-Systems, welche auf die Covid-19-Pandemie zurückzuführen sind. Da das OCT-System einen wesentlichen Beitrag zur Erzeugung von Datensätzen geleistet hat, verzögerten sich folglich die datenverarbeitenden Arbeitspakete.