

Teil I: Kurzbericht

zum Teilvorhaben Hyperspektrale-Thermo-
Reflexionsbildgebung und KI-basierte Qualitätssicherung

im Verbundprojekt Digitaler Remote Assistent zur
Zustandsanalyse und on-line Fehlerkorrektur von
Lasermaterialbearbeitungsprozessen



Zuwendungsempfänger: Fraunhofer-Gesellschaft

Förderkennzeichen: 13N15347

Laufzeit des Vorhabens: 01.08.2021 bis 31.12.2024

Aachen, den 30. Juni 2025

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Berichtersteller:
Wolfgang Fiedler

Mit Beiträgen von:
Peter Abels
Julius Neuß
Lukas Windeln

1 Ausgangssituation und Zielsetzung

Um die Produktqualität und Produktivität auch bei komplexen Fertigungsprozessen wie der Lasermaterialbearbeitung sicherzustellen, wird eine kontinuierliche Überwachung der relevanten Fertigungsparameter benötigt. Aktuelle Systeme ermöglichen zwar die Maschinenüberwachung und Predictive Maintenance, erfassen jedoch keine detaillierten werkstoff-, bauteil- oder prozessspezifischen Zustände. Fortschritte in der Digitalisierung und Technologien wie maschinelles Lernen und digitale Zwillinge bieten jedoch neue Möglichkeiten zur Analyse und Optimierung von Prozessen. Besonders in der Lasertechnik besteht aufgrund der Vielzahl an Einflussfaktoren ein hoher Bedarf an innovativen Ansätzen zur Defekterkennung, Fehleranalyse und Prozessoptimierung.

Ziel des Teilprojektes war die Entwicklung und mechanische Integration eines neuartigen Sensorkonzepts in eine Bearbeitungsoptik, sowie die Integration des neuartigen Systems in ein zusammen mit den Verbundpartnern zu entwickelndes Sensordatennetzwerks. Weitere Ziele waren die Entwicklung einer Auswertestrategie für die Sensordaten, als auch die Entwicklung und Implementierung KI-basierter Methoden zur Prozesszustandserkennung und online-Qualitätssicherung in enger Zusammenarbeit mit den Projektpartnern.

Darauf aufbauend sollte als übergeordnete Zielsetzung ein Laser-Remote-Assistent entstehen, mit dem sich Laserprozesse virtuell auch über große Entfernungen einstellen und korrigieren lassen. Die Sensordaten werden über geeignete Algorithmen und Datenverarbeitungstechniken miteinander verknüpft, um Aussagen zum jeweiligen Zustand des Laser-Bearbeitungsprozesses zu ermöglichen. Damit kann eine „Anamnese“ des Laserprozesses erstellt werden, auf dessen Basis sich Korrektur- und Justage-Maßnahmen einleiten lassen.

2 Ablauf des Forschungsprojektes

Das Vorhaben wurde mit einer Projektlaufzeit von drei Jahren beantragt und startete mit einem remote Kick-off Treffen am 9. September 2021. Das Vorhaben wurde nach drei Jahren und einer kostenneutralen Verlängerung von sechs Monaten zum 31.12.2024 beendet. Die Verlängerung war begründet in der Komplexität der einzelnen Forschungsaufgaben und insbesondere in der eng verzahnten Zusammenarbeit zwischen den einzelnen Teilvorhaben, wodurch notwendige Versuchs- und Validierungsarbeiten erst verzögert durchgeführt werden konnten. Die Aufgaben des Teilvorhabens wurden entsprechend dem übergeordneten Projektplan des Verbundprojektes gegliedert und zugeordnet, welcher die für das Teilvorhaben betreffenden Forschungsschwerpunkte Optik & Systemtechnik, digitales, multimodales Prozessbild und Datenhaltung sowie künstliche Intelligenz vorgab.

Das industriegetriebene Forschungsvorhaben im Verbundprojekt DireAL erforderte in allen Arbeitspaketen eine enge Verzahnung der Aufgaben zwischen den Verbundpartnern. Der intensive Austausch zwischen den in den Arbeitsgruppen beteiligten Partnern erfolgte in regelmäßigen Videokonferenzen sowie Arbeitsgruppentreffen, während denen eine Vor- bzw. Nachbereitung sowie Diskussionen zu den Ergebnissen stattfanden.

3 Wesentliche Ergebnisse

Das Fraunhofer ILT war maßgeblich an der Entwicklung und Implementierung eines digitalen, multimodalen Prozessabbilds beteiligt. Ziel war, die unterschiedlichen Sensorsysteme der Verbundpartner – namentlich die SCeye® Sensorik der Scansonic ALO4-O, die Messdaten des 4D.two Sensors der 4D Photonics GmbH sowie die Videoaufnahmen der seelector ICAMwelt der hema electronic GmbH – in eine einheitliche, strukturierte Datenhaltung zu überführen. In enger Abstimmung mit den Partnern wurden die jeweiligen Datenformate und Schnittstellen harmonisiert, sodass alle Sensordaten auf einem zentralen Edge Device (Windows-basierter Steuerrechner der Fertigungsanlage) zusammengeführt werden konnten. Die daraus generierten Datenströme bildeten die Grundlage für die nachfolgende Datenhaltung, Auswertung und die Remote Assistenz.

Das Fraunhofer ILT verantwortete die Entwicklung einer universellen Datenhaltungsinfrastruktur sowie die Integration und Auswertung der prozessbegleitenden Messdaten mittels KI-basierter Verfahren. Alle Sensordaten – Zeitreihen, Messreihen, Bilder, Videos, Prozessparameter und Metadaten – werden zunächst von der Control Unit zum Edge Device zusammengeführt und anschließend zentral im sogenannten Datacenter abgelegt. Die eindeutige Identifizierung der Datensätze erfolgt über das zugehörige Bauteil sowie die jeweilige Naht. Erkannte Fehler werden automatisiert an die oculavis SHARE Plattform übermittelt, indem dort ein Fehlerfall ("Error Case") erstellt wird. Diesem Case werden die relevanten Parameter und ein gezielt reduzierter Satz der Messdaten beigefügt. Die Datenhaltung gewährleistet damit die Nachverfolgbarkeit aller Prozessdaten, eine effiziente Auswertung sowie eine strukturierte Rückmeldung für Remote Assistenz und Qualitätssicherung.

Im Rahmen der Demonstration und Validierung wurde die Funktionalität aller Sensorsysteme im Gesamtsystem überprüft. Dabei lag der Fokus auf der fehlerfreien Zusammenarbeit der verschiedenen Sensoren und deren Integration in die Bearbeitungsoptik sowie die Fertigungsumgebung. Die Validierung der Datenhaltung und der KI-basierten Auswertung erfolgte im Live-Betrieb. Es wurde überprüft, ob die erfassten Daten korrekt gespeichert, verarbeitet und für die automatische Fehlererkennung sowie die Remote-Assistenz bereitgestellt werden. Die Praxistauglichkeit des Gesamtsystems konnte so nachgewiesen werden.

Ein weiteres KI-Modell zur semantischen Segmentierung wurde darüber hinaus im Echtzeitbetrieb evaluiert. Es war direkt an den Kamerafeed des SCeye®-Systems angebunden und ermöglichte die kontinuierliche Erfassung relevanter Merkmale des Schweißprozesses, darunter das Schmelzbad, die Drahtposition sowie die Nahtgeometrie. Nach Abschluss jeder Schweißung konnten diese Informationen konsolidiert visualisiert und als Grundlage für eine prozessbegleitende Analyse herangezogen werden.

Durch die automatisierte Datenauswertung und gezielte Datenreduktion wurde eine spürbare Effizienzsteigerung im Fertigungsprozess erreicht. Die modulare und flexible Systemarchitektur ermöglicht es, den entwickelten Ansatz problemlos auf andere Fertigungsprozesse und Branchen zu übertragen. Damit leistet das Projekt einen wichtigen Beitrag zur Digitalisierung und Vernetzung industrieller Fertigungsumgebungen im Sinne von Industrie 4.0, insbesondere durch die Integration moderner Sensorik, KI-basierter Auswertung und Remote-Assistenz.

Teil II: Eingehende Darstellung

zum Teilvorhaben Hyperspektrale-Thermo-
Reflexionsbildgebung und KI-basierte Qualitätssicherung

im Verbundprojekt Digitaler Remote Assistent zur
Zustandsanalyse und on-line Fehlerkorrektur von
Lasermaterialbearbeitungsprozessen



Zuwendungsempfänger: Fraunhofer-Gesellschaft

Förderkennzeichen: 13N15347

Laufzeit des Vorhabens: 01.08.2021 bis 31.12.2024

Aachen, den 30. Juni 2025

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Berichtersteller:
Wolfgang Fiedler

Mit Beiträgen von:
Julius Neuß
Lukas Windeln
Peter Abels

Inhalt

1	Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse	2
1.1	Anforderungen und Definitionen	2
1.1.1	Anforderungen an die digitale Remote-Assistenz im industriellen Umfeld	3
1.1.2	Spezifikation der Sensorhardware und optischen Systems	3
1.1.3	Definition und Spezifikation der Demonstratoren	4
1.2	Optik & Systemtechnik	4
1.2.1	Bestimmung geeigneter Wellenlängenbänder für die hyperspektrale Bildgebung	4
1.2.2	Entwicklung & Aufbau des multispektralen Kamerasystems inkl. Beleuchtungslaser	4
1.2.3	Integration des Sensorkonzeptes in die Bearbeitungsoptik	5
1.2.4	Aufbau eines Gesamtprototypen für die Demonstration	5
1.3	Digitales, multimodales Prozessabbild	7
1.3.1	Erweiterung der produktionsnahen Maschinen und Anlagen	7
1.3.2	Sensordatenfusion & Datenreduktion (multimodales Prozessabbild)	8
1.4	Datenhaltung & künstliche Intelligenz	10
1.4.1	Datenanalyse mittels KI / Detektion von Prozessunregelmäßigkeiten	10
1.4.2	Konsistente Integration von Messdatenströmen und Umsetzung einer geeignete Datenhaltung	12
1.5	Demonstration & Validierung	14
1.5.1	Evaluierung des Demonstratorsystems	15
2	Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	16
3	Notwendigkeit und Angemessenheit der Projektarbeit	16
4	Nutzen und Verwertbarkeit des Ergebnisses	16
5	Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	17
6	Erfolgte oder geplanten Veröffentlichungen der Ergebnisse	17
7	Danksagung	19

1 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

Zur Aufrechterhaltung der Produktqualität und Produktivität auch bei einer Verlagerung der Fertigung, bedarf es einer kontinuierlichen Kontrolle aller relevanten Fertigungsparameter, und im Fehlerfall einer schnellen und sicheren „Anamnese“ des Fertigungszustands, um geeignete Gegenmaßnahmen einleiten zu können. Maschinenhersteller und Nutzer sind in der Lage, den Zustand ihrer Produktionsmaschinen, auch on-line und auf Distanz, zu überwachen und mit Hilfe eines Predictive-Maintenance-Ansatzes Wartungsmaßnahmen durchzuführen. Werkstoff-, Bauteil- und vor allem prozessspezifische Zustände werden jedoch aufgrund fehlender Analyse-möglichkeiten nicht erfasst und können demnach auch nicht korrigiert werden.

Eine übergeordnete Auswertung mittels Verfahren des maschinellen Lernens ermöglicht eine integrierte Auswertung thermischer Prozessgrößen, hyperspektraler Merkmale sowie 3D-Informationen aus der Prozesszone. Dies bietet den Vorteil einer genaueren Fehler-Ursachen-Analyse sowie einer höheren Sensibilität bezüglich Defekterkennung während der Fertigung.

Mit der fortschreitenden Digitalisierung der Fertigung unter dem Stichwort Industrie 4.0 werden zunehmend einzelne Prozesse und Prozesslinien digital erfasst und als digitaler Zwilling oder digitaler Schatten in einer durchgängigen Datenwelt abgebildet. Im Bereich der Lasertechnik werden Sensoren zur Erfassung der Bauteilgeometrie sowie zur Erfassung der Prozessemission eingesetzt.

Mit der Nutzung eines digitalen Prozessabbildes können Fertigungsprozesse und Maschinen überwacht, optimiert, ortsunabhängig gesteuert und vorausschauend gewartet werden. In der industriellen Praxis existieren Systeme zur Maschinenüberwachung, bei denen Daten aus den Fertigungsprozessen an den Maschinenhersteller übertragen und zur Optimierung der Produktionsqualität und der Fertigungseffizienz genutzt werden. In Erweiterung dieser Ansätze sind darüber hinaus nicht nur die Maschinenkomponenten und Fertigungsabläufe zu überwachen, sondern auch einzelne Fertigungsprozesse, die sich bisher einer detaillierten digitalen Analyse und Beschreibung entziehen. Dies gilt insbesondere für komplexe Fertigungsprozesse, wie die Lasermaterialbearbeitung, bei der eine Vielzahl von Einflussfaktoren die Fertigungsqualität beeinflusst. Andererseits sind gerade diese Verfahren ideal geeignet, durch Optimierung von beispielsweise Leistung, Wechselwirkungsvolumen und -dauer, Wirkungsort, Zusatz- und Hilfswerkstoffen stets eine bestmögliche Prozesseinstellung zu realisieren.

1.1 Anforderungen und Definitionen

Ziel des Teilprojektes war die Entwicklung und mechanische Integration eines neuartigen Sensorkonzepts in eine Bearbeitungsoptik, sowie die Integration des neuartigen Systems in ein zusammen mit den Verbundpartnern zu entwickelndes Sensordatennetzwerk. Weitere Ziele waren die Entwicklung einer Auswertestrategie für die Sensordaten, als auch die Entwicklung und Implementierung KI-basierter Methoden zur Prozesszustandserkennung und online-Qualitätssicherung in enger Zusammenarbeit mit den Projektpartnern.

Darauf aufbauend sollte als übergeordnete Zielsetzung ein Laser-Remote-Assistent entstehen, mit dem sich Laserprozesse virtuell auch über große Entfernungen einstellen und korrigieren lassen. Die Sensordaten werden über geeignete Algorithmen und Datenverarbeitungstechniken miteinander verknüpft, um Aussagen zum jeweiligen Zustand des Laser-Bearbeitungsprozesses zu ermöglichen. Damit kann eine „Anamnese“ des Laserprozesses erstellt werden, auf dessen Basis sich Korrektur- und Justage-Maßnahmen einleiten lassen.

Die KI-basierte ganzheitliche Auswertung der erfassten Prozessinformationen stellte die Informationsgrundlage für das Gesamtprojektziel, das Laser-Remote-Assistenz-System dar, mit welchem eine ausführliche Analyse des Prozesses durch Spezialisten, ähnlich der Telemedizin, ermöglicht wird. Die Ergebnisse des digitalen Abbildes des aktuellen Prozesszustands können, mithilfe des Gesamtsystems, mit den Sollgrößen des Prozesses verglichen und gemeinsam mit realen Daten des Prozesses dem Maschinenbediener über ein Augmented-Reality-System visualisiert und ggf. per Remote-Assistent zur Verfügung gestellt werden.

Die Ziele des Teilvorhabens können folgendermaßen zusammengefasst werden:

- Entwicklung und Erprobung eines neuartigen Sensorsystems,
- Hardware- und softwareseitige Integration des Messsystems in ein Sensornetzwerk und Datenhaltungsinfrastruktur zur ganzheitlichen Analyse mittels künstlicher Intelligenz,
- Implementierung und Untersuchung moderner KI-basierter Methoden zur Prozesszustandserkennung und online-Qualitätssicherung unter Verwendung möglichst weniger Trainingsbeispiele.

1.1.1 Anforderungen an die digitale Remote-Assistenz im industriellen Umfeld

Das Fraunhofer ILT konnte hier seine Erfahrungen mit unterschiedlichen Laserfügeprozessen einbringen, um Nutzerbedürfnisse und Anforderungen an das Assistenzsystem zu beschreiben. Der Verbundpartner oculavis GmbH führte auf Basis der Informationen eine Analyse durch, welche als Grundlage für die Entwicklung einer adäquaten Mensch-Maschine-Schnittstelle diente, um den Remote Support unter Echtzeitbedingungen zu unterstützen.

1.1.2 Spezifikation der Sensorhardware und optischen Systems

Unter diesem Arbeitspunkt erfolgte die Beschreibung der funktionalen Anforderungen hinsichtlich der Bildgebung als auch an die KI-basierte Qualitätssicherung (Fehlerklassen, Erkennungsraten, Prozesstyp/Konfiguration, zu verwendende Bearbeitungsoptik, Laser, Material). Außerdem wurden Schnittstellendefinitionen des Sensornetzwerkes zur Integration unterschiedlicher Sensorkomponenten erarbeitet. Die Architektur des DiReAL-Gesamtsystems wurde im Rahmen von Projektworkshops gemeinsam mit allen Partnern entwickelt.

1.1.3 Definition und Spezifikation der Demonstratoren

Mit den Verbundpartnern wurde ein Demonstratorbauteil in der Form eines Batteriekastens aus Aluminium definiert und entsprechende Materialinformationen und Prozessparameter abgestimmt. Das Bauteil wurden in der Art ausgelegt, dass an diesem alle relevanten Lasernähte auftreten.

- Technische Spezifikationen:
 - Kastenprofil: Material ENAW6060, 3 mm Wandstärke
 - Deckblech: Material ENAW6016, 2 mm
 - Zusatzwerkstoff: ENAW4043, 1.6 mm Durchmesser
- Prozessparameter:
 - Laserleistung: 4-8 kW, typisch 5,5 kW
 - Robotervorschub: typisch 3 m/min
 - Drahtvorschub: typisch 3 m/min

1.2 Optik & Systemtechnik

Das zweite Arbeitspaket umfasst die Auslegung und Integration optischer sowie systemtechnischer Komponenten zur Realisierung des digitalen Remote-Assistenzsystems zur Zustandsanalyse und on-line Fehlerkorrektur von Lasermaterialbearbeitungsprozessen.

1.2.1 Bestimmung geeigneter Wellenlängenbänder für die hyperspektrale Bildgebung

Basierend auf den in AP1 festgelegten Anforderungen an den Temperaturmessbereich sowie an die zu erkennenden Prozessabweichungen bzw. -Fehler, wurden in diesem Arbeitspunkt zunächst Vorversuche in Form von spektroskopischen Messungen unternommen. Ziel war zunächst Mess-Wellenlängenbänder zu identifizieren, die zum Aufbau eines industriell einsetzbaren hyperspektralen Thermo-Reflexionsbildgebungssystems geeignet sind. Neben den technischen Randbedingungen spielten hier die Sensitivität bestimmter Wellenlängenbereiche hinsichtlich Temperaturänderungen und der Erkennung von kritischen Prozessfehlern eine große Rolle.

1.2.2 Entwicklung & Aufbau des multispektralen Kamerasystems inkl. Beleuchtungslaser

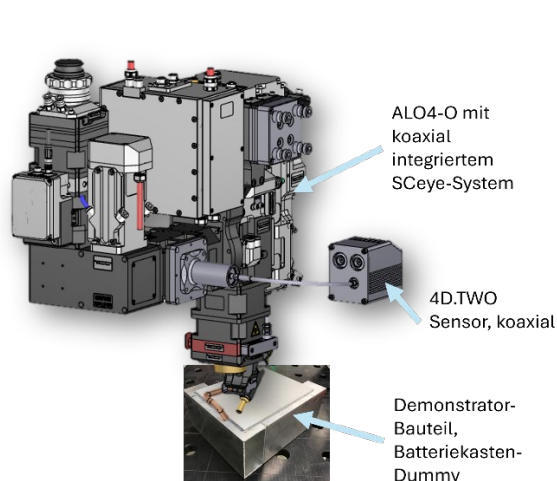
Im nächsten Schritt sollte die Hardware-Grundlage für die hyperspektrale Thermo-Reflexionsbildgebung entwickelt und untersucht werden. Hier stand zunächst die Bewertung der technischen Umsetzung eines integrierbaren Labormesssystems zur Messung spektral und örtliche aufgelöster Strahlung aus Prozesszone der Lasermaterialbearbeitung im Vordergrund.

Die finale Entscheidung über das zu verwendende Beleuchtungssystem für die Hyperspektrale-Thermo-Reflexionsbildgebung sollte während der Projektlaufzeit vom Konsortium getroffen

werden. Im Projektverlauf hatte sich jedoch gezeigt, dass das neuartige Sensorkonzept auf der Basis einer Hyperspektralen-Thermo-Reflexionsbildgebung nur grundlagenorientiert entwickelt werden kann, da zunächst physikalische Zusammenhänge identifiziert und untersucht werden müssen.

Aufgrund der während der Projektlaufzeit entwickelten Schwerpunkte, maßgeblich getrieben durch die industriellen Verbundpartner, wurde der Ansatz als im Rahmen des Vorhabens nicht zielführend nicht weiterverfolgt. Stattdessen wurde im weiteren Projektverlauf der industrielle hyperspektrale Multisensor 4D.two vom Projektpartner 4d GmbH eingesetzt. Der 4D.two greift das Prinzip des multispektralen Ansatzes zur Prozessbeobachtung auf und die Einbindung in den Demonstrator ist mit deutlich geringerem Aufwand direkt gegeben.

1.2.3 Integration des Sensorkonzeptes in die Bearbeitungsoptik



Aufbauend auf den in AP1 definierten technischen Anforderungen der ermittelten Leistungsfähigkeit und Randbedingungen wie erforderlicher örtlicher & spektraler Auflösung, Sichtfeld und Messfrequenz wurde das System derart gestaltet, dass es sich in Lasermaterialbearbeitungsoptiken integrieren lässt. Resultat des Arbeitspaketes war die technische Umsetzung eines integrierten Messsystems zur Messung spektral und örtliche aufgelöster Strahlung aus der Prozesszone der Lasermaterialbearbeitung inklusive mechanischer und elektrischer Schnittstellen (s. Abbildung 1).

Abbildung 1 Integration der Sensoren in die Bearbeitungsoptik

1.2.4 Aufbau eines Gesamtprototypen für die Demonstration

Bezüglich der geplanten Validierung des Gesamtsystems in Lasermaschinen im produktionsnahen Umfeld musste das Forschungsprojekt bereits zu Beginn einen Rückschlag hinnehmen, da der dafür zuständige assoziierte Partner trotz Lol aus übergeordneten wirtschaftlichen Gründen aus dem Konsortium ausschied. Das Fraunhofer ILT übernahm an dessen Stelle die wichtige Aufgabe hinsichtlich des Aufbaus eines Gesamt-Demonstrators und konnte die Fa. Carl Cloos Schweißtechnik GmbH als neuen assoziierten Partner gewinnen, wodurch dem Projekt eine Roboteranlage unentgeltlich zur Verfügung gestellt wurde. Die Integration der Bearbeitungsoptik ALO4-O in die Robotersteuerung als auch die Umsetzung eines Data Centers mit konsistenten Datenströmen aller Sensoren erforderte eine enge Abstimmung zwischen den Partnern und nicht zuletzt die Verfügbarkeit von Experten aller beteiligter Unternehmen.

Ressourcenbedingt kam es zu Verzögerungen bei der Inbetriebnahme des Gesamt-Demonstrators sowie bei der Beschaffung bzw. dem gesetzlich vorgeschriebenen Prozess der Ausschreibung von Komponenten nach UVgO. Letztendlich konnten die zur erfolgreichen Projektbearbeitung notwendigen personellen Kapazitäten auch nach gemeinschaftlicher Zustimmung aller Verbundpartner unter Verzicht auf die vertiefenden Arbeiten an der Hyperspektralkamera am Fraunhofer ILT bereitgestellt werden.

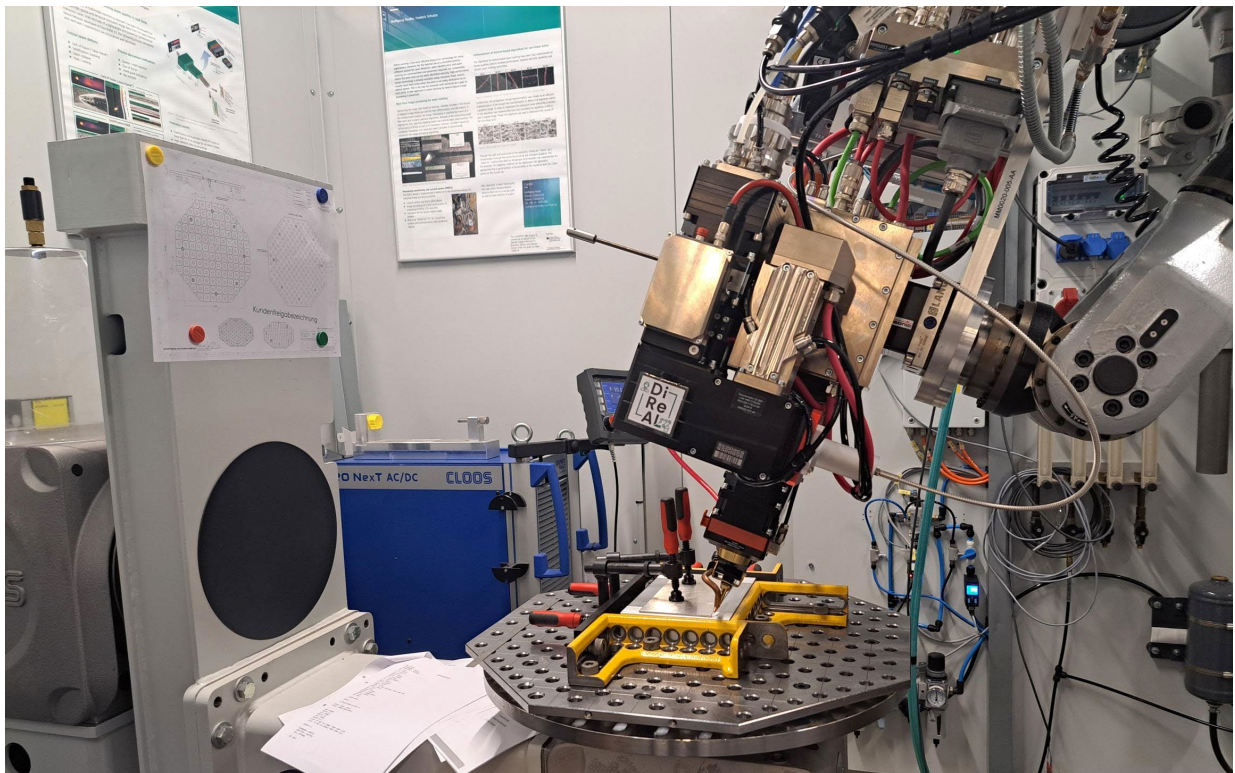


Abbildung 2 DiReAL Gesamt-Demonstrator

In Abbildung 2 wird der Aufbau des Gesamtprototypen für die Demonstration gezeigt. Basis des Demonstrators bildet eine Roboteranlage der Fa. Carl Cloos Schweißtechnik GmbH in Kombination mit einer Sicherheitszelle. Bei der Anlage handelt es sich um eine unentgeltliche Leihstellung im Gesamtwert von 373.000 EUR. Der Roboter verfügt über eine ausreichende Tragkraft (60 kg) und das zusätzliche Drehhandling ist fest in die Steuerung eingebunden. Die Sicherheitstechnik entspricht den geltenden Standards des Arbeitsschutzes und wurde aus Eigenmitteln zusätzlich finanziert.

Bei der Laserstrahlquelle handelt es sich um einen Trumpf Scheibenlaser TruDisk 12002 mit einem Lichtleitkabel LLK-D SMART 300 μm .

Die Bearbeitungsoptik der Fa. Scansonic Typ ALO4-O-DFD3W-1.0 ist optimiert für den automatisierten Bearbeitungsprozess beim Laserschweißen mit taktilem Nahtführung und Laserstrahloszillation. Auch hier handelt es sich um eine unentgeltliche Leihstellung im

Gesamtwert von 155.404 EUR. Das Gesamtsystem der Bearbeitungsoptik besteht aus den Komponenten ALO4-O, Netzbox, Steuerungsnetzbox sowie einem integrierten Auskoppelspiegel, welcher speziell für die Anforderungen hyperspektrale Multisensor 4D.two konzipiert ist.

Neben dem hyperspektralen Multisensor verfügt die ALO4-O über das integrierte, bildgebende Prozessüberwachungssystem SCeye®. Zusätzlich kann das High Dynamic Range Kamerasystem der Fa. hema lateral integriert werden.

Die Spannvorrichtung für Demonstrator-Bauteil besteht aus einer Wechseltischlochplatte angepasst an die Planscheibe des Werkstückpositionierers und aus entsprechenden Anschlagmitteln.

Des Weiteren besteht das Demonstratorsystem aus zwei mobilen Endgeräten, der HoloLens 2 Datenbrillen und einem iOS-basierten Tablet. Die Datenbrille diente der Verbindung mit Remote-Experten und zur Unterstützung bei Inbetriebnahme, Schulungen und Live-Demonstrationen im Rahmen des Projektes. Das Tablet wurde zur Visualisierung von Augmented Reality (AR)-Modellen genutzt.

Abschließend wurde das System noch mit Durchflusssensoren für Schutzgas, Crossjet und Kühlung ausgestattet, welche über digitale Anzeigen verfügen. Die Messsignale können über die Analogschnittstelle durch das SCeye® System erfasst und aufgezeichnet werden.

1.3 Digitales, multimodales Prozessabbild

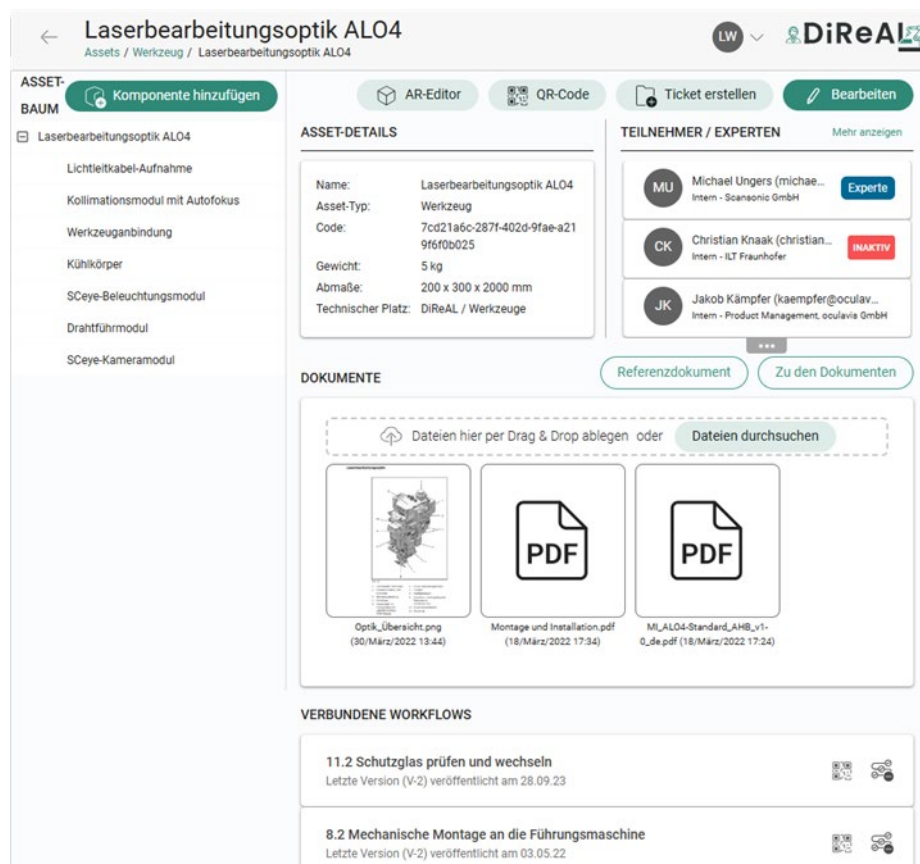
Das Fraunhofer ILT war maßgeblich an der Entwicklung und Implementierung eines digitalen, multimodalen Prozessabbilds beteiligt. Ziel war, die unterschiedlichen Sensorsysteme der Verbundpartner – namentlich die SCeye® Sensorik der Scansonic ALO4-O, die Messdaten des 4D.two Sensors der 4D Photonics GmbH sowie die Videoaufnahmen der seelector ICAMwelt der hema electronic GmbH – in eine einheitliche, strukturierte Datenhaltung zu überführen. In enger Abstimmung mit den Partnern wurden die jeweiligen Datenformate und Schnittstellen harmonisiert, sodass alle Sensordaten auf einem zentralen Edge Device (Windows-basierter Steuerrechner der Fertigungsanlage) zusammengeführt werden konnten. Die daraus generierten Datenströme bildeten die Grundlage für die nachfolgende Datenhaltung, Auswertung und die Remote Assistenz.

1.3.1 Erweiterung der produktionsnahen Maschinen und Anlagen

Um die Nachvollziehbarkeit, Auswertbarkeit und Rückverfolgbarkeit der Fertigungsprozesse sicherzustellen, war eine strukturierte Erfassung und Verknüpfung sämtlicher Prozessdaten und Metadaten unerlässlich. Daher wurden mehrere zentrale Verarbeitungsschritte umgesetzt: Zunächst erfolgten die Extraktion und Zuordnung relevanter Metadaten wie Versuchsreihe, Bauteilnummer und Nahtkennzeichnung. Diese Informationen werden bereits in der Robotersteuerung eingegeben, von der ALO4-O Steuerung während des Prozesses erfasst und im Rahmen der weiteren Datenverarbeitung extrahiert.

Alle beteiligten Maschinen und Sensoren, die Roboteranlage, der Dreh- und Schwenktisch, die ALO4-O Bearbeitungsoptik, sowie die Sensorsysteme SCeye®, 4D.two und hema seelector ICAMweld, sind in der oculavis SHARE Plattform mit vereinfachten Datenblättern und Anleitungen hinterlegt. Die bearbeiteten Bauteile werden ebenfalls in der Plattform verknüpft und für jedes System ist ein zuständiger Experte hinterlegt. Dadurch ist eine lückenlose Dokumentation, übersichtliche Bedienung und schnelle Expertenzuordnung im Fehlerfall möglich. Dies ist am Beispiel der ALO4-O in Abbildung 3 zu sehen.

Abbildung 3
Ansicht der
hinterlegten Daten
zur Scansonic ALO4-
O in der oculavis
Share-Plattform



1.3.2 Sensordatenfusion & Datenreduktion (multimodales Prozessabbild)

Die zeitliche Synchronisation der beteiligten Systeme erfolgt zunächst über ein Netzwerkprotokoll (NTP), um die Zeitstempel der verschiedenen Maschinen und Sensoren aufeinander abzustimmen. Allerdings kann es in der Praxis trotz NTP zu Abweichungen und einem allmählichen Auseinanderlaufen der Zeitbasen kommen.

Um eine möglichst synchrone Datenerfassung zu gewährleisten, wurde eine zusätzliche Triggerung durch die Robotersteuerung implementiert: Die ALO4-O Steuerung verfügt über einen digitalen Ausgang, der direkt mit einem analogen Eingang des 4D.two Sensors verbunden ist.

Dadurch wird die Datenerfassung beider Systeme zeitlich gekoppelt. Dennoch traten in der praktischen Anwendung immer wieder Unregelmäßigkeiten auf, etwa durch Änderungen im Roboterprogramm, unregelmäßige Signalversätze oder Verzögerungen zwischen digitalem Ausgang und analogem Eingang. Diese Faktoren führten dazu, dass die Synchronisation der Datenströme nicht immer eindeutig gewährleistet werden konnte.

Um die aufgezeichneten Daten des Scansonic Systems und des 4D-two Sensors durch ein multimodales maschinelles Lernmodell analysieren zu können, ist eine zeitliche Synchronisation im ersten Schritt unerlässlich. Diese Synchronisation stellt aufgrund zweier zentraler Herausforderungen eine komplexe Aufgabe dar. Erstens werden beide Sensoren durch unterschiedliche Signale ausgelöst, was dazu führt, dass ihre jeweiligen Aufnahmen nicht simultan gestartet werden können. Zweitens liegt die Abtastrate des 4D-two Sensors bei 4 kHz, während die Bildwiederholrate des SCeye® Systems lediglich 100 Hz beträgt. Diese Diskrepanz machte es erforderlich, eine Methode zu entwickeln, um die Datenströme zeitlich zu synchronisieren und sinnvoll zu überlagern.

Die Lösung bestand darin, einen der frei definierbaren Kombikanäle des 4D-two Sensors als analoges Signal über die ALO4-O Steuerung zu erfassen. Dadurch wurde dieser Kombikanal synchron zu den Kamerabildern aufgezeichnet. Im Anschluss konnte ein Algorithmus entwickelt werden, der den Kombikanal aus den Rohdaten des 4D-two Sensors errechnet und ihn mit dem analog aufgezeichneten Signal der ALO4-O synchronisiert. Diese Synchronisation ermöglicht es, die Anzahl der Datenpunkte zu bestimmen, die der 4D-two Sensor aufzeichnet, während das SCeye® System ein einzelnes Bild erfasst. Letztendlich kann somit für jedes aufgezeichnete Bild ein Datenpaket erzeugt werden, welches das Bild und den Ausschnitt aller 4D-two Kanäle über den relevanten Zeitraum enthält.

Im Rahmen der Fehlerfusion wurde festgelegt, dass Fehlerereignisse, die innerhalb von 5 mm Bauteillänge detektiert werden, als identisch betrachtet und zusammengeführt werden. Die Zuordnung erfolgt dabei anhand der synchronisierten Positions- und Zeitinformationen aus den Sensorsystemen und der Robotersteuerung.

Für die weitere Nutzung, insbesondere zur Übertragung relevanter Fehlerdaten an die oculavis SHARE Plattform, erfolgt eine gezielte Datenreduktion: Aus den umfangreichen Messdaten werden gezielt die relevanten Bilder, Videoausschnitte und Messwerte im Bereich des erkannten Fehlers extrahiert. So werden nur die für die Fehleranalyse und Remote Assistenz notwendigen Informationen bereitgestellt (s. Abbildung 4). Dies minimiert den Datenumfang und stellt sicher, dass die Analyse durch Experten effizient erfolgen kann.

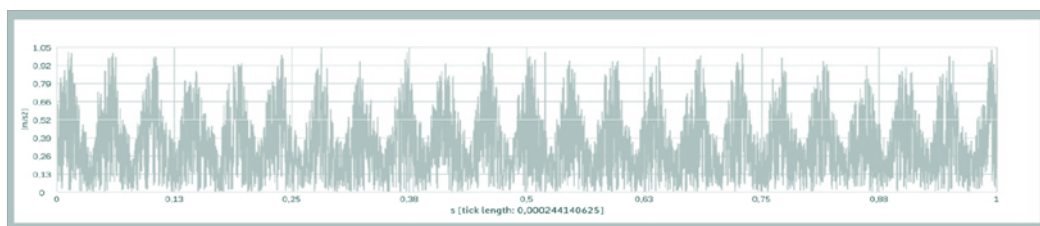


Abbildung 4 Darstellung prozessbezogener Informationen in der oculavis SHARE Plattform

1.4 Datenhaltung & künstliche Intelligenz

Das Fraunhofer ILT verantwortete die Entwicklung einer universellen Datenhaltungsinfrastruktur sowie die Integration und Auswertung der prozessbegleitenden Messdaten mittels KI-basierter Verfahren. Alle Sensordaten – Zeitreihen, Messreihen, Bilder, Videos, Prozessparameter und Metadaten – werden zunächst von der Control Unit zum Edge Device zusammengeführt und anschließend zentral im sogenannten Datacenter abgelegt. Die eindeutige Identifizierung der Datensätze erfolgt über das zugehörige Bauteil sowie die jeweilige Naht. Einzelne Messpunkte lassen sich über den Zeitstempel nach Prozessstart eindeutig zuordnen.

Erkannte Fehler werden automatisiert an die oculavis SHARE Plattform übermittelt, indem dort ein Fehlerfall ("Error Case") erstellt wird. Diesem werden die relevanten Parameter und ein gezielt reduzierter Satz der Messdaten beigelegt. Die Datenhaltung gewährleistet damit die Nachverfolgbarkeit aller Prozessdaten, eine effiziente Auswertung sowie eine strukturierte Rückmeldung für Remote Assistenz und Qualitätssicherung.

1.4.1 Datenanalyse mittels KI / Detektion von Prozessunregelmäßigkeiten

Zur Detektion von Prozessunregelmäßigkeiten werden die Kamerabilder aus dem SCeye® System mithilfe künstlicher neuronaler Netze analysiert. Das Ziel ist, ein neuronales Netzwerk zur Klassifikation einzelner Defekte sowie ein weiteres neuronales Netzwerk zur Extraktion relevanter Prozessgrößen aus den Kamerabildern zu trainieren. Das erste neuronale Netzwerk hat die Aufgabe, Defekte wie Poren und Spritzer zu erkennen, während das zweite neuronale Netzwerk durch semantische Segmentierung relevante Prozessgrößen wie Drahtposition, Schmelzbadgeometrie, Nahtgeometrie und Porengröße identifizieren soll. Als Backbone beider neuronaler Netzwerke wird ein Vision Transformer eingesetzt.

Vision Transformer (ViT) ist eine neuartige Architektur, die ursprünglich für die Verarbeitung von Textdaten entwickelt wurde, jedoch auch erfolgreich auf Bilddaten angewendet werden kann. Der Vision Transformer nutzt die Transformer-Architektur, die auf der Selbstaufmerksamkeit basiert, um Bilddaten zu verarbeiten. Im Gegensatz zu traditionellen Convolutional Neural Networks (CNNs), welche lokale Merkmale in Bildern extrahieren, verwendet der Vision Transformer eine globale Betrachtungsweise. Das Bild wird in kleinere Patches aufgeteilt, die dann als Eingabe für den Transformer dienen. Durch diese Patch-basierte Verarbeitung ermöglicht der Vision Transformer eine umfassende Analyse des gesamten Bildes.

Die Vorteile von Vision Transformern lassen sich wie folgt aufzählen:

1. **Globale Kontextanalyse:** Im Gegensatz zu CNNs, die sich stark auf lokale Merkmale konzentrieren, ermöglichen Vision Transformer eine globale Analyse des Bildes. Dies ist besonders vorteilhaft, wenn der Kontext des gesamten Bildes entscheidend für die Erkennung von Merkmalen ist.
2. **Flexibilität und Skalierbarkeit:** Vision Transformer sind äußerst flexibel und skalierbar, da sie auf die Größe der Eingabedaten und die Komplexität der Aufgabe angepasst werden können. Dies ist von Vorteil, da sich die Auflösung der SCeye® Bilder zwischen

dem Demonstrator und den Vorversuchen geändert hat. So können beide Bilddaten in ihrer ursprünglichen Auflösung verarbeitet werden.

3. **Verbesserte Leistung bei großen Datensätzen:** Vision Transformer haben sich als besonders leistungsfähig bei der Verarbeitung großer Datensätze erwiesen, da sie die Möglichkeit bieten, große Mengen an Bildinformationen effizient zu verarbeiten.

Der Nachteil dieser Architektur besteht darin, dass eine große Menge an Trainingsdaten erforderlich ist, um eine generalisierte und robuste Auswertung der Prozessdaten zu gewährleisten. Die Menge der verfügbaren Bilddaten wird durch Vorversuche und Bestandsdatensätze der Firma Scansonic abgedeckt, jedoch sind diese Daten nicht annotiert und können daher nicht direkt für das Training von neuronalen Netzen mittels herkömmlicher überwachter Lernansätze verwendet werden. Eine Annotation erfordert, dass ein Schweißexperte jedes Bild einzeln betrachtet und entscheidet, ob ein Fehler im Bild zu sehen ist. Für die Segmentierung muss zusätzlich manuell eine Polygonmaske um die relevante Region, wie etwa den Draht oder das Schmelzbad, gezeichnet werden.

Dies für die etwa 500.000 einzelnen Bilder der Prozessvideos zu tun, ist keine praktikable Option. Daher wurde ein zweistufiger Lernansatz gewählt. Die erste Stufe beinhaltet einen sogenannten selbstüberwachten Lernansatz (Self-supervised Learning). Dieser Ansatz erlangte spätestens durch den Erfolg großer Sprachmodelle Bekanntheit und verfolgt die Idee, dass ein KI-Modell seine Trainingsziele selbst generiert. Ziel ist es, dass das Modell die Struktur der Trainingsdaten versteht und in der Lage ist, diese Daten in abstrakte Merkmale zu übersetzen.

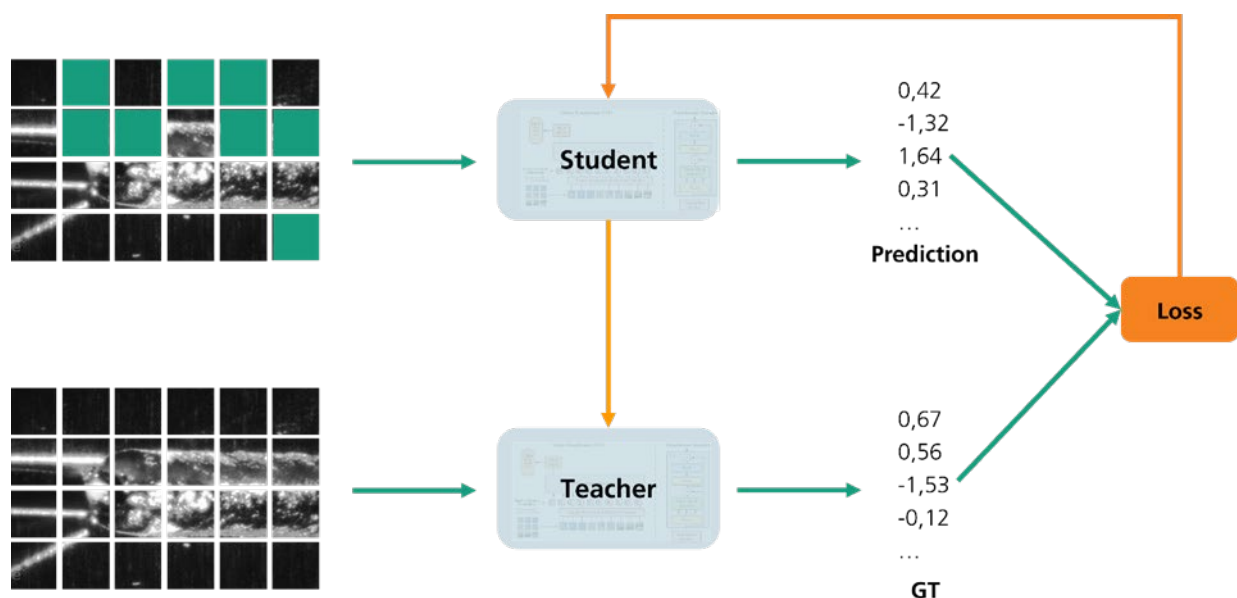


Abbildung 5 data2vec Ansatz angepasst auf das Laserstrahlschweißen

Der gewählte selbstüberwachte Lernansatz war ein sogenannter Joint Predictive Embedding Self-supervised Learning Ansatz namens **data2vec** (s. Abbildung 5). Dieser Ansatz funktioniert in der

Art, dass dem KI-Modell Informationen mittels Maskierungen auf dem Originalbild vorenthalten werden, welche das Modell dann auf der latenten Ebene rekonstruieren muss. Auf diese Weise lernt das Modell, die zugrunde liegenden Strukturen und Muster der Daten zu erfassen und zu interpretieren.

1.4.2 Konsistente Integration von Messdatenströmen und Umsetzung einer geeigneten Datenhaltung

Im Zentrum der Datenintegration steht die vom Fraunhofer ILT entwickelte Control Unit. Diese bildet die zentrale Verarbeitungslogik und besteht aus mehreren modularen Komponenten:

- Die Akquise-Module nehmen Datenströme der verschiedenen Sensoren entgegen.
- Die Vorverarbeitungs-Module bereiten die empfangenen Rohdaten für die weitere Verarbeitung auf.
- Das Datacenter-Modul übernimmt die strukturierte und zentrale Ablage sämtlicher Daten.
- Das Auswerte-Modul triggert verschiedene Auswertungsalgorithmen, synchronisiert die Ergebnisse und führt eine Zusammenfassung der detektierten Fehler durch.
- Das SHAPA-Modul steuert die Anbindung zur oculavis SHARE Plattform über die oculavis Partner *REST API* (SHAPA), indem dieses automatisiert Komponenten, Datensätze und Verknüpfungen anlegt und pflegt.

Die Control Unit übernimmt die Synchronisation aller einlaufenden Datenströme, die strukturierte Ablage und die Zusammenführung von Sensordaten zu konsistenten Datensätzen. Zudem werden die erkannten Fehlerfälle ("Error Cases") automatisch aufbereitet und an die oculavis SHARE Plattform übermittelt.

Für die konsistente Integration der verschiedenen Messdatenströme wurden unterschiedliche Datenquellen und -formate in jeweiligen Akquise Modulen vereinheitlicht und in das zentrale Datacenter überführt:

- **SCeye® Daten** werden mit einem durch die Fa. Scansonic bereitgestellten Tool in tabellarischer und Videoform aufbereitet und im Datacenter gespeichert. Metadaten, Parameter, Messreihen und Einzelbilder werden separat abgelegt.
- **4D.two-Messdaten** werden ursprünglich auf einem separaten System gespeichert. Ein Feedback-System wurde implementiert, das neue Datensätze erkennt, abrufen und an das zentrale Edge Device überträgt. Dort werden Sensor-Parametrierung und Messdaten getrennt und in die zentrale Datenbank überführt.
- **Videos der hema Kamera** werden inklusive der aktuellen Kameraeinstellungen ebenfalls im Datacenter abgelegt.

In der Konfiguration der Control Unit kann die verwendete Sensorik ausgewählt werden. Sobald für einen Prozess alle Sensordaten im Datacenter gesichert sind, werden die (ebenfalls konfigurierbaren) Auswertalgorithmen, wie z. B. die DiReAL-KI, automatisch angestoßen.

Erkannte Fehler werden nach Synchronisation mit anderen Algorithmen (innerhalb von 5 mm Bauteillänge als identisch gewertet) ebenfalls im Datacenter und in der oculavis SHARE Plattform dokumentiert. Für jeden Fehlerfall werden relevante Messdaten, Bilder und Metadaten extrahiert und als "Error Case" angelegt, inklusive Zuordnung zum Verantwortlichen und zur Produktkomponente.

Die Positionsbestimmung der Fehler erfolgt dabei anhand von Roboter-Bahngeschwindigkeit, Zeitstempel und Prozessbeginn. So ist eine lückenlose Rückverfolgbarkeit und strukturierte Weiterverarbeitung der Qualitätsdaten gewährleistet.

Während der Auswertung legt die Control Unit über die SHAPA relevante Elemente in der oculavis SHARE Plattform an. Bauteile wie der Batteriekasten werden angelegt und mit den verwendeten Maschinen, Sensoren und Schweißparametern auf der Plattform verknüpft. Nach Abschluss eines Schweißvorgangs werden Informationen zur Naht und zugehörige Parameter im System ergänzt. Eine Schweißnaht wird als unter Komponente des Batteriekastens angelegt und detektierte Schweißfehler wiederum als unter Komponente der Schweißnaht. So wird ein vollständiges Digitales Abbild jedes Bauteils geschaffen.

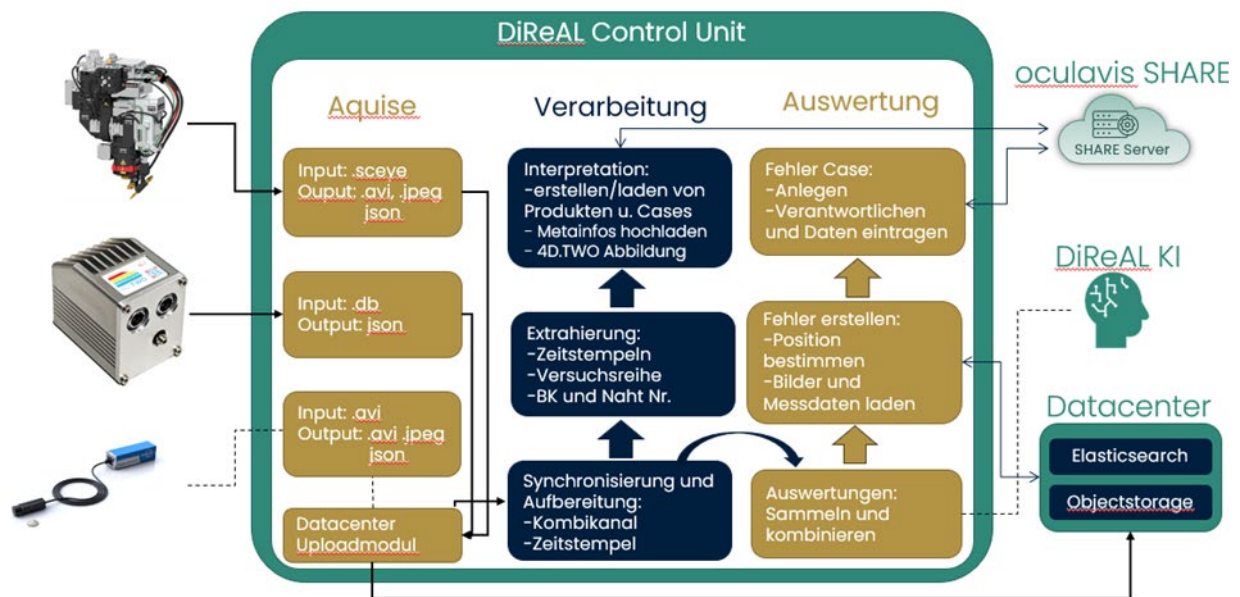


Abbildung 6 Schematische Darstellung der Control Unit und den verbundenen Datenströmen

Komponenten des Datacenters

Das zentrale Datacenter wurde durch eine Kombination aus *Elasticsearch* und einem *Simple Storage Service (S3)* realisiert. Messreihen, Parameter und Metadaten werden in *Elasticsearch* abgelegt, einer dynamischen *NoSQL* Datenbank, die insbesondere für die schnelle Suche und Analyse großer, unstrukturierter Datenmengen optimiert ist. *Simple Storage Service (S3)* dient als Objektspeicher und ist besonders für die effiziente Speicherung und den schnellen Zugriff auf

einzelne große Dateien wie Bilder und Videos ausgelegt. Über Querverweise (IDs) in *Elasticsearch* können die zugehörigen Mediendateien eindeutig den jeweiligen Datensätzen zugeordnet werden. Die in Abbildung 6 dargestellte Architektur ermöglicht eine dauerhafte Speicherung und effiziente Analyse der Prozessdaten.

Zur Visualisierung und Auswertung der Prozessdaten werden in *Kibana* ausgewählte Dashboards genutzt. *Kibana* ist eine Software, die typischerweise gemeinsam mit *Elasticsearch* eingesetzt wird und als deren Visualisierungskomponente dient. Diese ermöglichen eine interaktive Suche, Filterung und grafische Darstellung der gespeicherten Mess- und Qualitätsdaten. So können beispielsweise Fehleranalysen, Trendbetrachtungen und Verlaufsauswertungen effizient durchgeführt werden, um Prozessabweichungen leichter zu erkennen und Optimierungsmaßnahmen abzuleiten.

1.5 Demonstration & Validierung

Im Rahmen der Demonstration und Validierung wurde die Funktionalität aller Sensorsysteme im Gesamtsystem überprüft. Dabei lag der Fokus auf der fehlerfreien Zusammenarbeit der verschiedenen Sensoren und deren Integration in die Bearbeitungsoptik sowie die Fertigungsumgebung.

Ein weiterer Schwerpunkt war der Test der Datenintegration und -weiterleitung im Fertigungsumfeld. Hierbei wurde sichergestellt, dass alle relevanten Messdaten zuverlässig erfasst, synchronisiert und an die zentrale Datenhaltungsinfrastruktur übermittelt werden.

Die Validierung der Datenhaltung und der KI-basierten Auswertung erfolgte im Live-Betrieb. Es wurde überprüft, ob die erfassten Daten korrekt gespeichert, verarbeitet und für die automatische Fehlererkennung sowie die Remote-Assistenz bereitgestellt werden. Die Praxistauglichkeit des Gesamtsystems konnte so nachgewiesen werden.

Die Validierung der entwickelten KI-Modelle erfolgte sowohl im Rahmen einer abschließenden Versuchsreihe als auch bei Projektabschluss unter praxisnahen Bedingungen. Die erste Validierungsphase wurde im Zuge einer Masterarbeit durchgeführt. Hierfür wurde ein neuer, unabhängiger Validierungsdatensatz erstellt, auf dessen Grundlage verschiedene vortrainierte Encoder-Modelle hinsichtlich ihrer Fähigkeit zur Erkennung oberflächlicher Poren sowie geometrischer Abweichungen in der Schweißnaht getestet wurden. Die Modelle erzielten eine Klassifikationsgenauigkeit von 99 %, bei einem Recall von 99 % und einer Precision von ebenfalls 99 %. Diese Ergebnisse deuten auf eine zuverlässige Detektionsleistung unter den gewählten Testbedingungen hin.

Ein weiteres KI-Modell zur semantischen Segmentierung wurde darüber hinaus im Echtzeitbetrieb evaluiert. Es war direkt an den Kamerafeed des SCeye-Systems angebunden und ermöglichte die kontinuierliche Erfassung relevanter Merkmale des Schweißprozesses, darunter das Schmelzbad, die Drahtposition sowie die Nahtgeometrie. Nach Abschluss jeder Schweißung konnten diese Informationen konsolidiert visualisiert und als Grundlage für eine prozessbegleitende Analyse herangezogen werden. Das Ergebnis ist exemplarisch in Abbildung 7 dargestellt.

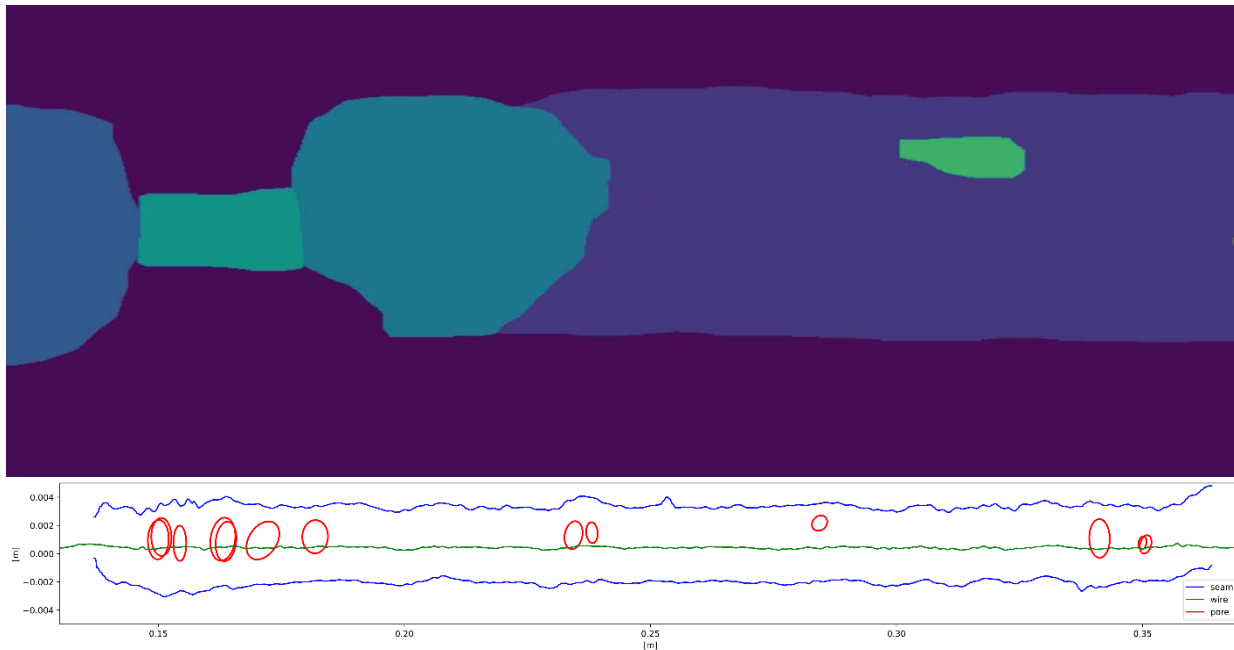


Abbildung 7 Segmentierungsmaske der SCeye® Prozessvideos mit erkannter Drahtposition, Schmelzbadgeometrie, Nahtgeometrie und Poren (oben). Auf Basis der Segmentierung wurde die gesamte Schweißung als Panorama dargestellt (unten)

1.5.1 Evaluierung des Demonstratorsystems

Im Anschluss an die Demonstration erfolgte eine umfassende Evaluierung des Demonstrator Systems. Dabei wurde die Systemstabilität und Zuverlässigkeit im Dauerbetrieb bewertet.

Besonderes Augenmerk lag auf der Identifikation von Optimierungspotenzialen, beispielsweise bei der zeitlichen Synchronisation der verschiedenen Datenströme und bei der gezielten Reduktion des Datenvolumens. Die gewonnenen Erkenntnisse dienen als Grundlage für mögliche zukünftige Weiterentwicklungen des Systems.

2 Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Im Teilvorhaben „Hyperspektrale-Thermo-Reflexionsbildgebung und KI-basierte Qualitätssicherung“ des DiReAL-Verbundprojektes **D**igitaler **R**emote **A**ssistent zur Zustandsanalyse und on-line Fehlerkorrektur von **L**asermaterialbearbeitungsprozessen war der wesentliche Teil der Kosten durch Personalausgaben entstanden.

Kostenart	Abgerechnete Kosten
Pos. 0813 (Materialkosten)	9.086,31 €
Pos. 0837 (Personalkosten)	722.540,61 €
Pos. 0838 (Reisekosten)	1.636,25 €
Pos. 0847 (Abschreibungen auf vorhabenspezifische Anlagen)	55.518,28 €
Pos. 0850 (Sonstige unmittelbare Vorhabenkosten)	104,82 €
Pos. 0856 (Kosten innerbetrieblicher Leistungen)	25.840,00 €
Summe:	814.726,27 €

An zweiter Stelle folgten Ausgaben für den Aufbau des Demonstratorsystems insbesondere für die Integration aller Sensorsysteme in die Roboteranlage sowie den Aufbau des digitalen Remoteassistenten, die durch die Anschaffung folgender Komponenten entstanden:

SNAPSHOT SWIR Camera, Objektive, Tablet, Microsoft Hololens 2, Wechseltischlochplatte, Spannsystem, Versuchswerkstoffe.

Die Ausgaben für Dienstreisen sind zum einen in der Versuchskampagne bei einem Verbundpartner als auch in den Arbeitsgruppen- und Verbundtreffen begründet.

3 Notwendigkeit und Angemessenheit der Projektarbeit

Die durchgeführten Forschungsarbeiten im Teilvorhaben sowie die dafür aufgewandten Ressourcen waren notwendig und angemessen, da sie der im Projektantrag formulierten Planung entsprachen und alle wesentlichen im Arbeitsplan formulierten Aufgaben erfolgreich bearbeitet wurden. Darüber hinaus waren keine zusätzlichen Ressourcen für das Projekt notwendig.

4 Nutzen und Verwertbarkeit des Ergebnisses

Durch die automatisierte Datenauswertung und gezielte Datenreduktion wurde eine spürbare Effizienzsteigerung im Fertigungsprozess erreicht. Die modulare und flexible Systemarchitektur ermöglicht es, den entwickelten Ansatz problemlos auf andere Fertigungsprozesse und Branchen

zu übertragen. Damit leistet das Projekt einen wichtigen Beitrag zur Digitalisierung und Vernetzung industrieller Fertigungsumgebungen im Sinne von Industrie 4.0, insbesondere durch die Integration moderner Sensorik, KI-basierter Auswertung und Remote-Assistenz.

Obwohl die Demonstrator-Anlage künftig für andere Zwecke eingesetzt wird, bleibt sie weiterhin am Fraunhofer ILT in Betrieb. Dadurch können die bestehenden Datenströme auch zukünftig für die Datenerfassung und Weiterentwicklung der Auswertungsmethoden genutzt werden.

5 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Dem Zuwendungsempfänger sind auf dem Gebiet der digitalen Remote Assistent zur Zustandsanalyse und on-line Fehlerkorrektur von Lasermaterialbearbeitungsprozessen keine Fortschritte speziell zu dem erörterten Ansatz anderer Stellen bekannt.

6 Erfolgte oder geplanten Veröffentlichungen der Ergebnisse

Maßnahmen zur Öffentlichkeitsarbeit wurden mit dem Ziel umgesetzt, die Projektergebnisse einer breiten Fachöffentlichkeit sowie potenziellen Anwendergruppen zugänglich zu machen. Der Fokus lag hierbei auf praxisnahen Live-Demonstrationen, Fachvorträgen und der Teilnahme an branchenspezifischen Konferenzen und Messen. Diese Aktivitäten verfolgten das Ziel, die entwickelten Lösungen zur AR-gestützten Remote-Unterstützung und Prozessdatenvisualisierung im industriellen Umfeld frühzeitig sichtbar zu machen, Nutzerfeedback einzuholen und die technologische Anschlussfähigkeit an bestehende Systeme potenzieller Kunden zu zeigen.

Übersicht der wichtigsten Veranstaltungen:

AKL 2022 "International Laser Technology Congress"

Live Demonstration and Projektkonzeptvorstellung

Ort: Forschungslabor mit DiReAL Demonstrator

Veranstalter: Fraunhofer Institut für Lasertechnik Aachen (ILT)

Datum: 04.05.2022

Conference AI for Laser Technology 2023

Vorstellung Projektergebnisse im Rahmen der Konferenzvorträge

Veranstalter: Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT

Datum: 23. – 24. November 2023

AKL 2024 “International Laser Technology Congress”

Vorträge im Rahmen des FORUM – Digitalisierung und KI in der Photonischen Produktion

Booth: „Digitalisierung & KI in der Photonischen Produktion“ mit Vorstellung des DiReAL Demonstrators

Veranstalter: Fraunhofer Institut für Lasertechnik Aachen (ILT)

Datum: 17. – 19.04.2024

LASER World of Photonics & automatica 2025

Sonderschau: „Photonics Meets Robotics, AI Success Stories“ A3, 433

Teilnehmende Partner: oculavis, Scansonic, 4D GmbH, Fraunhofer ILT

Datum: 24.–27. Juni 2025



Abbildung 8 Präsentation des DiReAL Exponats auf dem Sonderstand „Photonics meets Robotics: AI Success Stories“ im Rahmen der LASER World of Photonics & automatica 2025 für den bayerischen Wirtschaftsminister Hubert Aiwanger.

Darüber hinaus wurde ein LinkedIn-Kanal für das Projekt mit betrieben, über welchen regelmäßige Neuigkeiten, technische Meilensteine und Veranstaltungshinweise publiziert wurden. Dieser Kanal dient sowohl der Vernetzung als auch der Erhöhung der Sichtbarkeit des Projektes.

7 Danksagung

Das Verbundprojekt DiReAL wurde mit freundlicher Unterstützung vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) nach einem Beschluss des Deutschen Bundestages gefördert. Wir bedanken uns für die Förderung und beim Projektträger VDI Technologiezentrum für die hervorragende Zusammenarbeit. Weiterhin bedanken wir uns für die Unterstützung unserer Kollegen und aller Verbundpartner, deren Fachwissen die Forschungsaktivitäten überhaupt ermöglicht hat.