

SCHLUSSBERICHT

zum Innovationsvorhaben der verlinked GmbH

QuSAM

Qualitätssichere Skalierbarkeit des WAAM-Prozesses zur Herstellung von Luftfahrtstrukturkomponenten

Förderkennzeichen: 20Q2121A

im Rahmen des 2. Aufruf des Luftfahrtforschungsprogramms VI (LuFo VI-2)

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Laufzeit des Vorhabens: 01.04.2022 – 30.09.2025

Zuwendungsempfänger: **verlinked GmbH**
Am Hoppenhof 32
33104 Paderborn

Ansprechpartner: Dr. Benjamin Nagel

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor/bei den Autoren.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	1
1. Aufgabenstellung und Projektziele.....	2
2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde.....	4
3. Planung und Ablauf des Vorhabens.....	5
4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde.....	10
5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	13
6. Eingehende Darstellung der Projektergebnisse.....	14
HAP 3 – Verbesserte Produktions- und Prozessplanung.....	14
In HAP 3 stand die Digitalisierung des Fräsprozesses zur Steigerung der Effizienz in der Prozessplanung und der Materialbearbeitung im Vordergrund.....	14
AP 3.3 – Frässtrategieoptimierung durch Machine Learning.....	14
HAP 4 – Steigerung der Prozesssicherheit und Effizienz durch horizontal digitalisierte Prozesskette.....	14
AP 4.1 – Upscaling der Datenintegration.....	15
AP 4.2 – Auswahl KI-Strategien und Definition der Inputgrößen.....	20
AP 4.3 – Validierung der digitalen Prozesskette und Definition des Prozessfensters für qualitätssichere Skalierbarkeit und Bauteilhomogenität.....	21
AP 4.4 – Datenanalyse, -komprimierung und -sicherung, Dokumentation und Wissensverwertung.....	28
7. Zusammenfassung der Projektergebnisse.....	33
8. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises.....	34
9. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	34
10. Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere bzgl. Verwertbarkeit der Ergebnisse.....	35
11. Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen.....	35
12. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses.....	36

1. Aufgabenstellung und Projektziele

Globale Zielsetzung des Vorhabens

Mit der Entwicklung effizienter, digitalisierter und skalierbarer Fertigungsprozesse, adressiert das Verbundprojekt QuSAM das förderpolitische Ziel einer umweltfreundlicheren Luftfahrt. Im technologischen Fokus steht hierbei der Einsatz additiver Fertigungstechnologien, um die luftfahrtspezifische Produktion umweltfreundlicher zu gestalten. Insbesondere der geringere Material- und Energieaufwand eröffnet signifikante Optimierungsmöglichkeiten. Zur erfolgreichen Realisierung dieser Potentiale im industriellen Umfeld, ist die Sicherstellung der gleichbleibenden und wiederholbaren Fertigungsqualität erforderlich.

Im Rahmen dieses Vorhabens wird eine skalierbare und digitalisierte Prozesskette aufgebaut, die eine durchgängige Transparenz des gesamten Fertigungsprozesses herstellt. In Bezug auf die globalen Ziele des Verbundprojektes wird durch diesen technologischen Fortschritt die Wettbewerbsfähigkeit der beteiligten Unternehmen am Standort Deutschland nachhaltig verbessert. Zugleich erhöhen die umweltfreundlicheren Fertigungsprozesse die Akzeptanz der Luftfahrt.

Die sich hieraus ergebenen, globalen Ziele für das Vorhaben werden im Folgenden beschrieben.

- Durch die Transparenz im Fertigungsprozess wird eine signifikante Steigerung der Prozesssicherheit erreicht. Dies führt zu einer deutlich höheren Homogenität der Bauteileigenschaften. Durch die Reduktion des Ausschusses um mindestens 10 % wird eine Verbesserung der ökologischen Bilanz erreicht. Die Demonstration der verbesserten Prozesssicherheit erfolgt mit der Validierung in MS3.
- Die digitale Optimierung der Prozessfenster führt zu einer nachhaltigen Effizienzsteigerung der Prozesskette. Mit den angestrebten Verbesserungen wird eine Senkung der mittleren Prozessdurchlaufzeit von mindestens 20 % erreicht. Die höhere Effizienz führt zu einer verstärkten Akzeptanz der additiven Fertigungsansätze. Die Messung und Prüfung Optimierung erfolgt mit der abschließenden Validierung in MS3.

Technologische Arbeitsziele des Vorhabens

Die Umsetzung der beschriebenen globalen Vorhabensziele erfolgt durch verlinked im Wesentlichen durch die Arbeiten in HAP 4. Hier konzipiert, entwickelt und validiert verlinked mit den beteiligten Partnern Softwarekomponenten, welche eine effiziente Arbeitsvorbereitung und Fertigungsplanung sowie eine durchgängig digitale Prozessüberwachung ermöglichen. Die hierbei zu erreichenden, technologischen Arbeitsziele sind nachfolgend aufgeführt.

- Entwicklung einer Systemarchitektur für die hochskalierende Integration von Daten aus der Prozesskette.
- Konzeption eines systematischen Vorgehens zur Validierung von KI-Strategien und die Bereitstellung von relevanten Inputdaten für die Durchführung KI-gestützter Prozessoptimierungen.
- Digitalisierte Abbildung der vollständigen Prozesskette mit horizontal integrierten digitalen Zwillingen.

- Entwicklung einer Softwarekomponente zur automatischen Erstellung luftfahrtgerechter Bauteil-Konformitätserklärungen (CoC) mit revisionssicherer Langzeitarchivierung (>30 Jahre).
- Validierung der Korrektheit digital optimierter Prozessfenster in Bezug auf die gewünschte Gefüge- und damit Bauteilqualität.

2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Projekt QuSAM wurde vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz gefördert. Das Projektteam bestand aus der HEGGEMANN AG, der Technischen Universität München, der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg und der verlinked GmbH.

Für die Durchführung der Forschungsarbeiten und die damit verbundenen experimentellen Erprobungen hat verlinked eine eigene Entwicklungsinfrastruktur, welche für die Anforderungen des Projektes erweitert und angepasst wurde. Hierzu gehörten insbesondere verschiedene Peripheriegeräte sowie Steuerungs- und Kameratechnik, welche im Rahmen des Projektes datentechnisch vernetzt wurden.

In dem Modus Operandi, erfolgten die grundlegenden Arbeiten und Erprobungen zunächst als isolierte Prototypen unter den Laborbedingungen bei verlinked. Anschließend konnte die Integration mit den dazugehörigen System- und Integrationstest an der WAAM-Zelle im Reallabor bei der HEGGEMANN AG durchgeführt werden.

Die umfangreichen Kompetenzen in der Digitalisierung hochkomplexer und anlagenübergreifender Fertigungsprozesse konnten für die anspruchsvollen Aufgabenstellungen in dem QuSAM Projekt genutzt werden und haben wesentlich zum Projekterfolg beigetragen. Neben der Erfassung und Konsolidierung der heterogenen Datenbestände konnten Vorerfahrungen aus Projekten zum KI-Einsatz in industriellen Prozessen, auch bei der Anbindung an die Steuerungsebene, im Sinne ML-basierter Frässtrategieoptimierung, genutzt werden.

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Der erfolgreiche Verlauf des Verbundprojekts beruhte in wesentlichem Maße auf einer engen Abstimmung zwischen den beteiligten Partnern sowie auf einer eindeutig definierten Aufgaben- und Verantwortungsverteilung. Zur strukturierten Bearbeitung der inhaltlich und organisatorisch anspruchsvollen Projektinhalte wurde das Vorhaben in vier Hauptarbeitspakete gegliedert, die wiederum in insgesamt 18 fachliche Arbeitspakete unterteilt wurden. Die Struktur des Vorhabens ist in dem Projektstrukturplan in Abbildung 1 dargestellt.

Die Leitung eines Hauptarbeitspakets lag jeweils in der Verantwortung eines geförderten Verbundpartners. Die übergeordnete Koordination des Gesamtvorhabens war im Arbeitspaket 0 (Projektmanagement) verankert und wurde durch die HEGGEMANN AG wahrgenommen.

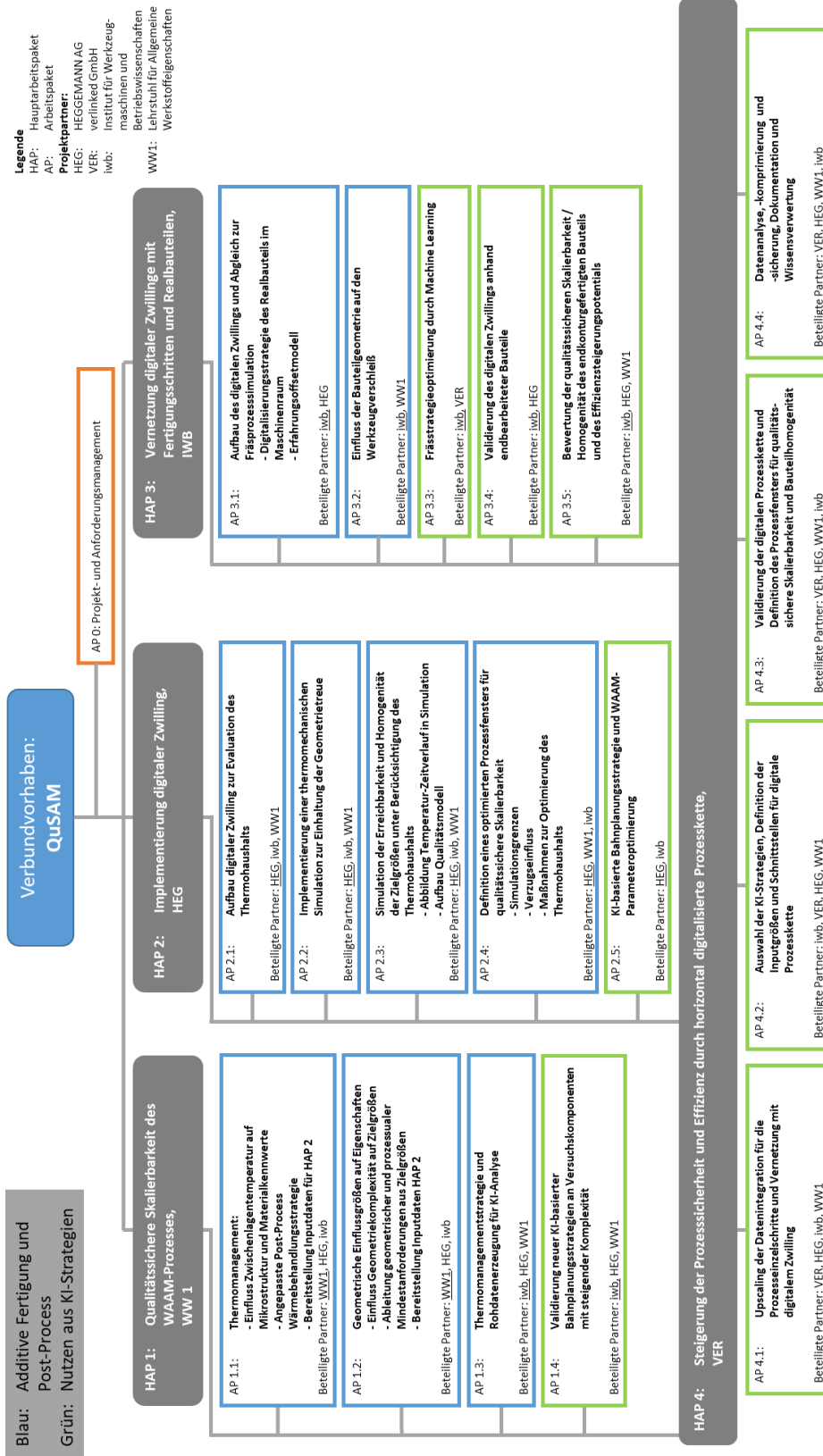


Abbildung 1. Projektstrukturplan

Das Forschungsprojekt begann am 01.04.2022 und sollte in der ursprünglichen Planung nach einer Laufzeit von 36 Monaten am 31.03.2025 enden. Darüber hinaus wurden auf Verbundebene drei Meilensteine definiert, die der projektbegleitenden Erfolgskontrolle dienten. Die inhaltlichen und zeitlichen Schnittstellen zwischen den Arbeitspaketen sowie die jeweiligen Abhängigkeiten wurden in enger Abstimmung mit sämtlichen Projektpartnern festgelegt.

Am 29.11.2024 wurde in Abstimmung mit den Projektpartnern eine kostenneutrale Verlängerung um sechs Monate bis zum 30.09.2025 beantragt, welche am 24.03.2025 mittels eines Änderungsbescheides durch den Projektträger bestätigt wurde. Von Seiten der verlinked GmbH war die kostenneutrale Verlängerung aus den folgenden Gründen erforderlich:

Zeitlich verzögerter Beginn des Projektes

Der Projektantrag wurde mit dem Schreiben vom 13.04.2021 rückwirkend zum 01.04.2021 bewilligt. Nach Eingang des Zuwendungsbescheides hat verlinked mit der Gewinnung neuer Mitarbeiter bzw. dem Wechsel von Mitarbeitern aus anderen Projekten begonnen. Vor dem Hintergrund des Fachkräftemangels und der hohen internen Auslastung konnte erst im Juni mit den Arbeiten begonnen werden. Hierdurch hat sich der Beginn des Projektes entsprechend verzögert.

Höhere Komplexität bei der luftfahrtkonformen Langzeitdokumentation

Die Arbeit an der Datenanalyse, -komprimierung und -sicherung sowie die Erstellung einer luftfahrtkonformen Dokumentation in AP 4.4 hat sich komplexer dargestellt, als ursprünglich geplant. Die Vorgaben aus den verschiedenen Standards konnten nicht direkt auf eine technische Umsetzung übertragen werden, so dass hier aufwendige konzeptionelle Arbeiten erforderlich waren. Auch die Auswahl und Aggregation von relevanten Parametern für die Speicherung war anspruchsvoller als angenommen.

Durch die kostenneutrale Verlängerung ergab sich ein geänderter Projektplan, welcher in Abbildung 2 dargestellt ist. Im Rahmen der verlängerten Zeitplanung konnten alle Meilensteine erfüllt und die Arbeitspakete erfolgreich abgeschlossen werden

In dem Projektzeitraum wurden verschiedene Meetings und Workshops mit den Projektpartnern durchgeführt. Ergänzend zu den Präsenzmeetings wurden im 14-tägigen Rhythmus digitale Arbeitskreismeetings durchgeführt.

Die drei Verbundpartner kamen zudem an den folgenden Terminen zu Präsenzmeetings zusammen:

Datum	Meeting
01.06.2022	Kickoff mit Projektträger (HEGGEMANN) mit Projektträger
23.11.2022	1. Halbjahresmeeting (Online)
04.05.2023	2. Halbjahresmeeting (HEGGEMANN)
22.11.2023	3. Halbjahresmeeting (HEGGEMANN) mit Projektträger
05.06.2024	4. Halbjahresmeeting (TUM)
27.11.2024	5. Halbjahresmeeting (FAU)
27.05.2024	6. Halbjahresmeeting (verlinked)
01.10.2025	Abschlussmeeting (HEGGEMANN) mit Projektträger

Tabelle 1. Übersicht Projekttreffen und Workshops im Projekt QuSAM

Für den Datenaustausch stellte die TU München einen SharePoint zur Verfügung, dadurch konnte die Organisation des Projektes maßgeblich verbessert werden.

4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Systemarchitekturen für vernetzte Produktionsprozesse

Die Thematik von Architekturen und Referenzmodellen für die Vernetzung von Produktionsprozessen wird in der Literatur oft im Kontext von Industrie 4.0 betrachtet. Hier bietet RAMI 4.0 (Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0) eine standardisierte Architektur, um Systeme, Produkte, oder Dienstleistungen digital durchgängig zu verknüpfen [1]. Abgebildet werden hierbei verschiedene Ebenen, von der Geschäftsprozessebene bis in die Feldebene. Die Integration der verschiedenen Ebenen wird durch standardisierte Schnittstellen sichergestellt.

Ein weiteres bekanntes Referenzmodell für die Ebenen übergreifende System-Vernetzung innerhalb von Industrieunternehmen ist die Automatisierungspyramide. Eine allgemeine Darstellung des Konzeptes ist in Abbildung 3 illustriert. Diese Ausprägung basiert auf der Definition gemäß IEC 62264 [2]. Es werden unterschiedliche Ebenen von dem Produktionsprozess bis zur strategischen Unternehmenssteuerung unterschieden. Die Integration der Daten findet hierbei vertikal statt.

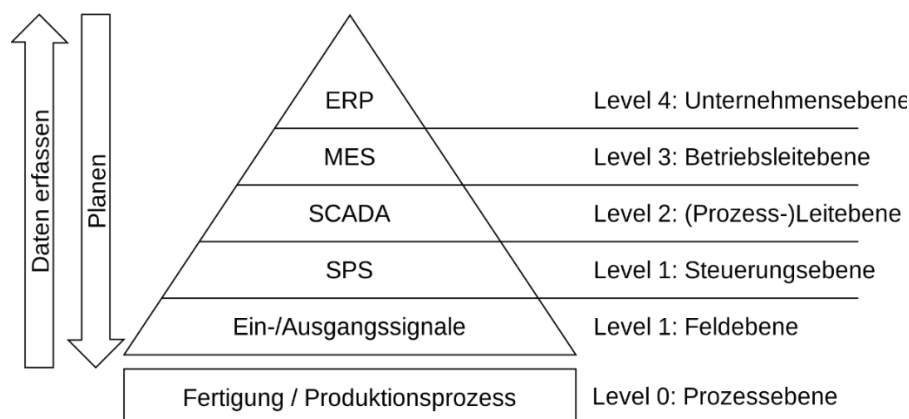


Abbildung 3: Automatisierungspyramide mit den Bezeichnungen Level 0 bis 4 nach IEC 62264 (Quelle: wikipedia)

In der Literatur werden verschiedene Varianten der Automatisierungspyramide diskutiert. Das Modell nach Siepmann [3] führt eine differenziertere Unterscheidung in sechs (6) Ebenen durch. Die vereinfachte Automatisierungspyramide nach ISA95 von Bildstein und Seidenmann [4] beschreibt eine kompaktere Darstellung mit drei (3) Schichten. Einen stärkeren Schwerpunkt auf Kommunikation und Integration findet sich in dem Ansatz von Hoppe [5]. Hierbei wird zwischen den verschiedenen Schichten jeweils ein expliziter Communication Layer eingefügt.

Die bestehenden Referenzmodelle bieten einen konzeptionellen Rahmen, welche aber nicht die konkreten technischen Anforderungen in dem jeweiligen Anwendungsfall berücksichtigen.

Daher können strukturelle Aspekte hinsichtlich einzelner Komponenten genutzt werden. Die erforderlichen Funktionen einer hochskalierbaren Systemarchitektur unter Berücksichtigung performanter Infrastrukturkomponenten gehen deutlich über den aktuellen Stand der Technik hinaus.

Vernetzung digitaler Zwillinge

Digitale Zwillinge sind ein zentrales Konzept der Digitalisierung im industriellen Umfeld. Zur Verknüpfung von physischen Assets und digitalen Zwillingen wurde das Konzept der Verwaltungsschale erarbeitet [6]. Diese dient dazu, sämtliche Informationen zu einem Asset dem zugehörigen digitalen Zwilling anzuhängen. Nach diesem Modell hat jeder Stakeholder in einer Wertschöpfungs- oder Prozesskette eine eigene Verwaltungsschale, und reicht die Informationen zu dem Produkt immer weiter. Die Verwaltungsschale berücksichtigt somit den Lebenszyklus von Produkten, bietet allerdings keine Unterstützung für die vollständige, horizontale Integration der digitalen Zwillinge über die gesamte Prozesskette hinweg.

Datenmanagement für Big Data Anwendungen

Ein effizientes und skalierbares Datenmanagement ist die Voraussetzung für die technische Realisierung von Anwendungen zur Verarbeitung großer Datenmengen (Big Data). Wie in [7] beschrieben, ist neben dem Datenvolumen auch die Interoperabilität der Systeme eine Herausforderung für die Integration.

Bestehende Ansätze, wie z.B. in [8], zielen auf die Reduktion der zu verarbeitenden Daten oder entsprechende Vorverarbeitungen. Für die Optimierung werden auch die Parallelisierung der Verarbeitungsprozesse und die Indexierung der Datenbestände vorgeschlagen.

Im Fokus des Ansatzes in [9] steht die Bereinigung der Daten. Dies beinhaltet die Identifikation von unvollständigen, ungenauen oder unplausiblen Daten und die Korrektur bzw. das Löschen dieser Daten. Hierdurch wird die Datenqualität so verbessert, dass die Verarbeitung effizienter wird. Die bestehenden Konzepte bieten nützliche Ansätze die als Teilkomponenten integriert werden können.

Die besondere Herausforderung in diesem Vorhaben liegt in der Identifikation und Berechnung der relevanten Kenngrößen aus den erfassten Rohdaten. Zusätzlich gibt es luftfahrtspezifische Anforderungen an die Persistierung dieser Daten. Diese speziellen Anforderungen können nicht durch bestehende Ansätze erfüllt werden.

Eigene Vorarbeiten

Verlinked besitzt umfangreiche Kompetenzen im Bereich der Vernetzung von technischen Anlagen, insb. Steuerungen, Roboter und Sensoren. In verschiedenen Projekten wurden Fertigungsanlagen in kleinen und mittelständischen metallverarbeitenden Betrieben vernetzt. Die erfassten Maschinen- und Prozessdaten wurden in die IT-Landschaft der jeweiligen Unternehmen zur weiterführenden Verarbeitung integriert. Für einen hochspezialisierten Lohnfertiger im Bereich Individualfertigung hochkomplexer Metallteile wurden mehrere Schweißroboter

über ein lokales Maschinendatenetzwerk angebunden und die gewonnenen Daten in ein ERP System zur Kostennachkalkulation integriert. Des Weiteren wurden erfolgreiche Projekte im Bereich IIoT für den Weltmarktführer im Bereich der elektrischen Verbindungstechnik durchgeführt. Hierbei wurde eine IIoT Plattform entwickelt und diese mit verschiedensten Feldgeräten (z.B. Industriesteuerungen, Überspannungsschutzsensoren, Label-Printern) vernetzt.

In dem Forschungsprojekt CogeP im Rahmen des Spitzencluster it's OWL beschäftigte verlinked sich mit der Steigerung des Automatisierungsgrades von Prüfplätzen für intelligente mechatronische Systeme. Hierbei wurde nicht nur die Automatisierung zur Handhabung von Produkten und Prüfeinrichtungen für Funktionstests betrachtet, sondern auch die Durchgängigkeit von Prüfdaten über den gesamten Lebenszyklus sichergestellt. Im Vordergrund der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten von verlinked stand dabei die Integration von Daten- und Schnittstellenmodellen mit Steuerungs- und Verhaltensmodellen als digitaler Zwilling mit dem Produkt sowie der Prüfumgebung.

Literatur

Nr.	Literaturverweis
[1]	Heidel, R.; Hoffmeister, M.; Hankel, M.; Döbrich, U.: Basiswissen RAMI 4.0 – Referenzarchitekturmodell mit Industrie 4.0 Komponente. Beuth Verlag GmbH, 2017
[2]	DIN EN 62264-1, Integration von Unternehmens-EDV und Leitsystemen, Teil 1: Modelle und Terminologie, 2013
[3]	Siepmann, D.: Industrie 4.0 - Technologische Komponenten, in: Einführung und Umsetzung von Industrie 4.0, Roth, A. (Hrsg.), Berlin Heidelberg, Springer Gabler Verlag, S. 47-72, 2016
[4]	Bildstein, A. und Seidelmann, J.: Industrie 4.0-Readiness: Migration zur Industrie 4.0-Fertigung, in: Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik, Bauernhansl, T.; Hompel, M. und Vogel-Heuser, B. (Hrsg.), Wiesbaden, Springer Vieweg, S. 581-597, 2014
[5]	Hoppe, S.: Standardisierte horizontale und vertikale Kommunikation: Status und Ausblick, in: Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik, Bauernhansl, T.; Hompel, M. und Vogel-Heuser, B. (Hrsg.), Wiesbaden, Springer Vieweg, S. 325-341, 2014
[6]	Lachenmaier, J.F.; Haußmann C.; Kemper, H.G.; Lasi, H.: Entwicklung, Produktion und Einsatz von Industrie 4.0-Komponenten – Betriebswirtschaftliche Potenziale des digitalen Zwillings in der Produktion. In: Obermaier, R. (eds): Handbuch Industrie 4.0 und Digitale Transformation. Springer Gabler, Wiesbaden, 2019
[7]	A. Kadadi, R. Agrawal, C. Nyamful and R. Atiq, "Challenges of data integration and interoperability in big data," 2014 IEEE International Conference on Big Data (Big Data), 2014
[8]	Chen, J., Chen, Y., Du, X. et al. Big data challenge: a data management perspective. Front. Comput. Sci. 7, 157–164, 2013
[9]	Lidong Wang, "Heterogeneous Data and Big Data Analytics." Automatic Control and Information Sciences, vol. 3, no. 1, 8-15, 2017

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Zusammenarbeit innerhalb des QuSAM-Projektkonsortiums verlief durchgehend sehr konstruktiv und zielführend. Sowohl die im vierzehntägigen Turnus stattfindenden Projektsitzungen als auch die bilateralen Abstimmungen leisteten einen wesentlichen Beitrag zum erfolgreichen Projektverlauf und zu den erzielten Ergebnissen.

Das Interesse der assoziierten Partner nahm im Projektverlauf mit Ausnahme von Boeing und Dynamore tendenziell ab. Im Fall von Fronius International war diese Entwicklung auf personelle Umstrukturierungen zurückzuführen; ungeachtet dessen wurde das Projekt bis zum Abschluss weiterhin im Rahmen eines klassischen Supports unterstützt.

Im Rahmen eines studentischen Projektes haben wir bei der Umsetzung von AP 4.3 mit dem bib International College in Paderborn zusammengearbeitet. Über eine Laufzeit von drei Monaten haben zwei Studenten eine prototypische Implementierung für das Tooling in Abbildung 12 und Abbildung 13 entwickelt. Für das exzellente Ergebnis wurde die Arbeit auf der Absolventenfeier 2025 des bib mit dem Preis für das beste Studentenprojekt ausgezeichnet (Abbildung 4).



Abbildung 4. Auszeichnung "bestes Studentenprojekt" (v.l. Dr. Benjamin Nagel, Ilja Groo, Sergej Jahne, Frank Lammersen)

6. Eingehende Darstellung der Projektergebnisse

HAP 3 – Verbesserte Produktions- und Prozessplanung

In HAP 3 stand die Digitalisierung des Fräsprozesses zur Steigerung der Effizienz in der Prozessplanung und der Materialbearbeitung im Vordergrund.

AP 3.3 – Frässtrategieoptimierung durch Machine Learning

Ziel des Arbeitspakets 3.3 war die Nutzbarmachung des in AP 3.2 entwickelten Verschleißmodells zur KI-basierten Bewertung von Frässtrategien. Aufbauend auf den in AP 3.1 simulierten Zerspanungskräften sollte eine Methodik entwickelt werden, die Frässtrategien bewertet und eine fundierte Entscheidungsgrundlage für die Auswahl geeigneter Strategien bereitstellt.

Mit dem Partner iwB wurden zunächst Grundlagen für eine Optimierung der Frässtrategie auf Basis von Machine Learning Ansätzen erarbeitet. Der Schwerpunkt lag hierbei auf der Umsetzung datenspezifischer Anforderungen, so dass im ersten Schritt relevante Qualitätskriterien für die Bewertung der Frässtrategien identifiziert und definiert wurden.

Auf Basis der definierten Qualitätskriterien und der Datenvorverarbeitung, wurde eine Frässtrategieoptimierung erarbeitet. Der Fokus war hierbei auf der Minimierung der Bearbeitungszeit. Verlinked hat sich insbesondere mit der Identifikation relevanter Datenpunkte im NC-Programm sowie deren Verarbeitung in der Optimierung beschäftigt. Für die Bewertung der erreichten Optimierung wurden entsprechende Metriken und KPIs definiert.

Das in AP 3.2 entwickelte Verschleißmodell wurde strukturell so aufbereitet, dass es mit den in AP 3.1 simulierten Zerspanungskräften gekoppelt werden konnte. Ziel war die rechnerische Prognose des Verschleißverlaufs in Abhängigkeit der jeweiligen Frässtrategieparameter.

Zur Reduktion des Rechenaufwands wurde untersucht, inwiefern datengetriebene Modelle das gekoppelte Simulations- und Verschleißmodell approximieren können. Hierzu wurden mehrere Machine-Learning-Ansätze untersucht und hinsichtlich ihrer Prognosegüte evaluiert. Ziel war die Entwicklung eines Modells, das eine schnelle Bewertung neuer Frässtrategien ermöglicht.

Die Implementierung und Parametrierung erfolgte auf Basis der verfügbaren Simulationsdaten. Aufgrund des begrenzten Projektzeitraums sowie der eingeschränkten Datenbasis konnte jedoch kein ML-Modell identifiziert werden, das eine hinreichend robuste und generalisierbare Prognosequalität erreicht. Eine belastbare Reduktion des Simulationsaufwands konnte daher innerhalb des Arbeitspakets nicht in der angestrebten Qualität realisiert werden.

Die grundlegende Zielsetzung – die Nutzbarmachung des Verschleißmodells zur Bewertung von Frässtrategien – wurde in konzeptioneller und methodischer Hinsicht erreicht. Die Kopplung der Modelle sowie die Definition einer Bewertungslogik stellen eine tragfähige Grundlage für weiterführende Optimierungsansätze dar.

HAP 4 – Steigerung der Prozesssicherheit und Effizienz durch horizontal digitalisierte Prozesskette

Der inhaltliche Schwerpunkt von HAP 4 lag beim Aufbau und bei der Integration einer performanten, horizontal digitalisierten Prozesskette. Ziel der Digitalisierung ist die Steigerung der Prozesssicherheit und Effizienz sowie die luftfahrtkonforme Dokumentation des gesamten Produktionsprozesses.

AP 4.1 – Upscaling der Datenintegration

Die Arbeiten in AP 4.1 waren auf eine Optimierung der Datenintegration über die einzelnen Schritte der gesamten, horizontalen Prozesskette ausgerichtet. Es konnte so eine hochfrequente Verarbeitung von sehr großen Datenmengen (Big Data) realisiert und ein effizienter Zugriff auf diese Daten bereitgestellt werden.

Im ersten Schritt hat verlinked eine umfangreiche Analyse zu Anforderungen an die Datenbasis durchgeführt. Hierzu wurden auch gewonnene Datenbestände aus dem Vorgängerprojekt REGULUS gesichtet und bewertet.

Als eine wesentliche Herausforderung stellte sich die Datenerfassung und -integration an der WAAM-Anlage heraus. Um die Anforderungen an die zu erfassenden Daten und die erforderliche Performance zu analysieren, wurden zunächst die relevanten Datenquellen und -arten untersucht. Für die WAAM-Anlage konnten dabei die folgenden Datenarten identifiziert werden:

- Energiedaten an der Schweißgerätstromquelle,
- Positionsinformationen an der Schnittstelle des ABB-Roboterarms und
- geometrische Informationen aus dem ABB-Steuerungsprogramm.

Im weiteren Verlauf des Projektes wurde die Datenerfassung um Temperaturdaten und Verbrauchsdaten für Schweißzusatzwerkstoffe (Schweißdraht) ergänzt. Abbildung 5 zeigt in der Übersicht die finalen Komponenten und deren Zusammenwirken an der WAAM-Zelle.

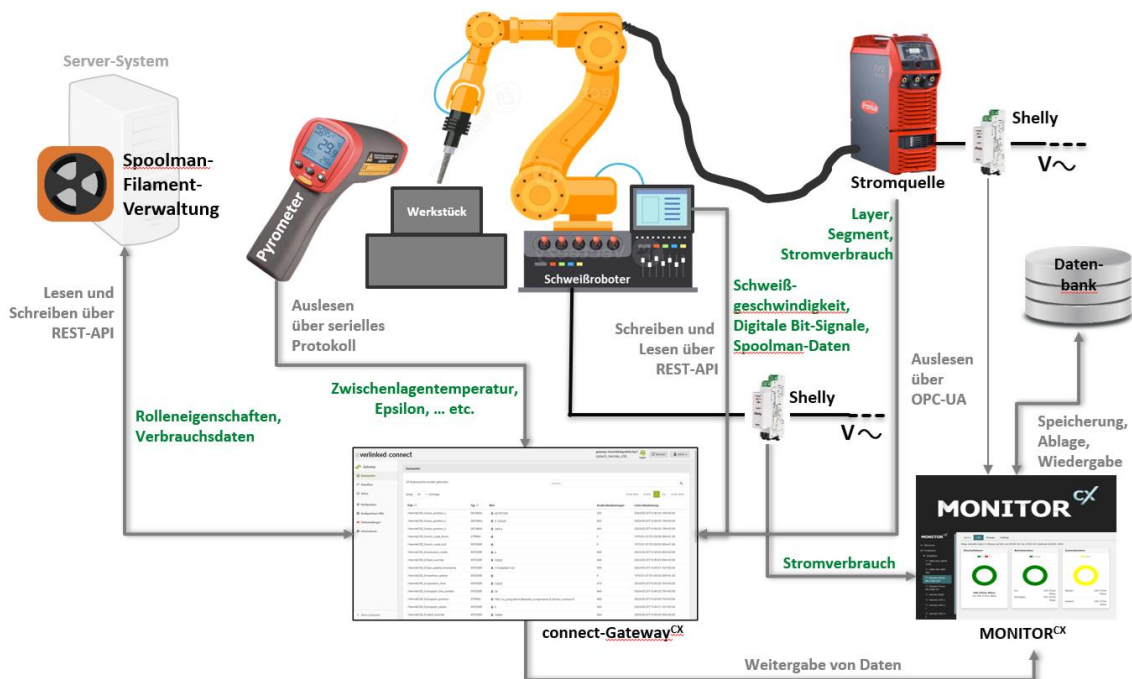


Abbildung 5: Finaler Aufbau der Subsysteme an der WAAM-Anlage

Für die Erfassung der geometrischen Daten aus dem ABB-Steuerungsprogramm gibt es keine Standard-Schnittstelle. Zur Datenintegration für diesen Prozessschritt, wurde hierfür eine neue Schnittstelle konzipiert und implementiert. Hierdurch können Daten bzw. Parameter per TCP direkt aus dem Steuerprogramm ausgelesen und so eine flexible und hochfrequente Datenerfassung ermöglicht werden.

Eine vergleichbare Ausgangssituation zeigte sich bei der Ermittlung von Temperaturwerten. Diese werden über ein Pyrometer erfasst, für das auf Grundlage der vorhandenen seriellen Kommunikationsschnittstelle ebenfalls eine neue Schnittstelle entwickelt wurde.

Ergänzend zur Anforderungsanalyse hinsichtlich der Datenbasis wurden die relevanten Prozesse systematisch aufgenommen und beschrieben. Die Darstellung der Verhaltensaspekte wurde dabei um datentechnische Dimensionen erweitert, sodass eine datenbasierte Sicht auf die horizontale Prozesskette entwickelt werden konnte.

Als konzeptionelle Basis für die nachhaltige Steigerung der Prozesssicherheit und Effizienz wurde ein Systemarchitekturmodell zur Abbildung von horizontal digitalisierten Prozessketten erforscht. Als Grundlage für die Integration der Daten aus verschiedenen Quellen über die gesamte Prozesskette hinweg wurde zudem ein entsprechendes Datenbankschemata erstellt und validiert. Neben der ganzheitlichen Betrachtung aller relevanten Datenpunkte stand hierbei vor allem ein effizienter Zugriff auf die Daten im Vordergrund. Für die digitale Abbildung des Prozesses wurde darüber hinaus der Datenfluss analysiert und aufgenommen. Dies beinhaltet sowohl den zentralen WAAM-Prozess als auch den nachgelagerten Prozess des „Frärens“. Der konzeptionelle Aufbau der Datenerfassung ist in Abbildung 6 dargestellt.

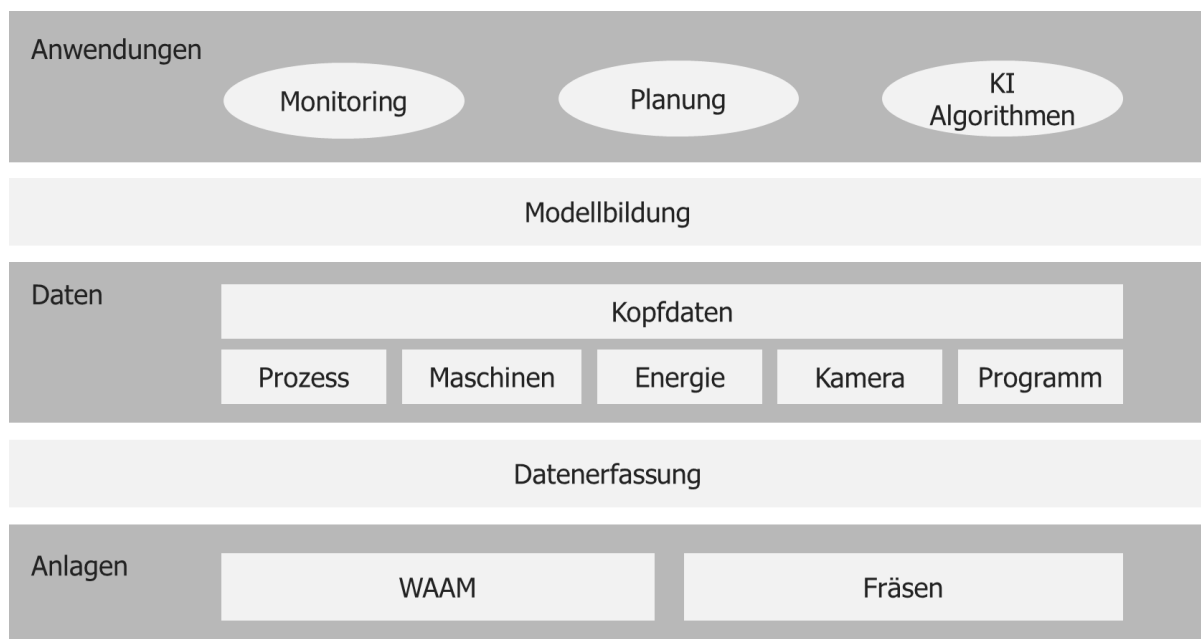


Abbildung 6. Architektur Datenintegration

Auf Basis des verlinked *connect-Gateway*^{CX} wurde eine zentrale MDE-Komponente auf einem Server im Unternehmensnetzwerk installiert und eingerichtet. Die Erfassung der Daten aus den Steuerungen der jeweiligen Anlagen erfolgt über die vorhandene Netzwerkinfrastruktur.

Ergänzend zu den Prozessdaten wurden auch Energie- und Verbrauchsdaten zeitabhängig erfasst. Hierzu wurden, analog zur in Abbildung 7 dargestellten Ausführung, an mehreren Anlagen und an unterschiedlichen Messpunkten externe Stromzähler des Typs „Shelly Pro“ installiert. Mithilfe von Stromwandlern werden die Verbrauchswerte direkt an der elektrischen Verkabelung gemessen. Über eine ausgehende Netzwerkschnittstelle werden die auf diese Weise erfassten Energiedaten durch die Shelly-Strommessgeräte ebenfalls an die MDE Komponente übertragen.

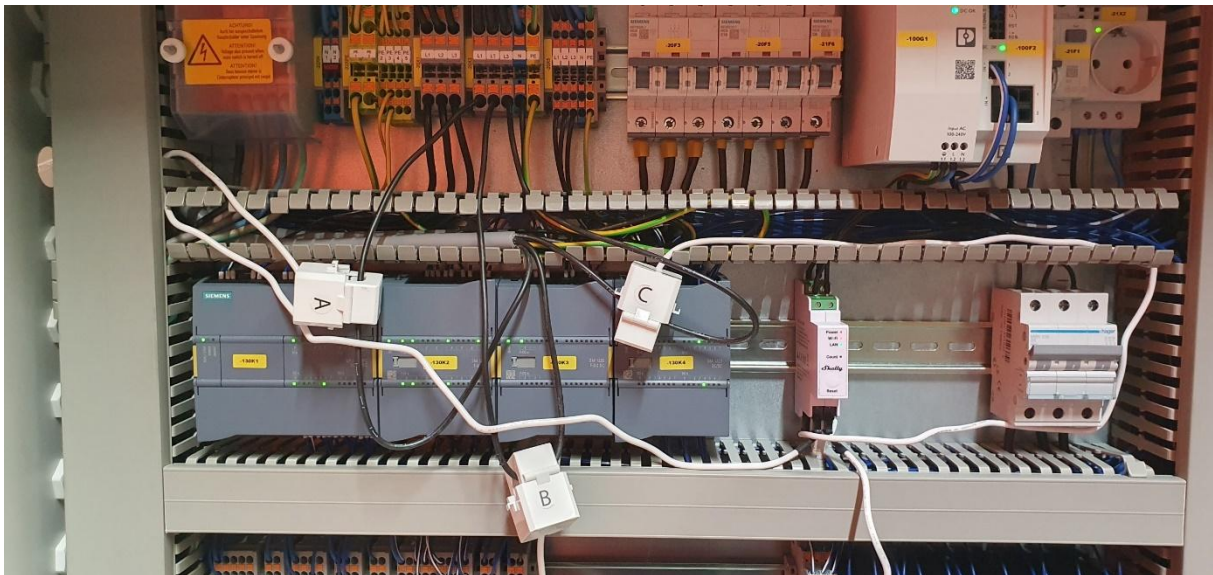


Abbildung 7: Installierte Stromzähler "Shelly Pro" an der WAAM-Anlage

Zur durchgängigen datentechnischen Abbildung des vollständigen WAAM-Prozesses (inkl. der nachgelagerten Prozesse) wurden die erfassten Prozess- und Energiedaten danach durch den identifizierten Prozessfluss miteinander verknüpft. Durch die Aggregation der Daten sowie die logische Verknüpfung kann eine automatisierte und vollständige Prozessdokumentation auf Basis der Abbildung mit Live-Daten erstellt werden (siehe hierzu AP 4.2 und AP 4.3).

Neben den zeitabhängigen, dynamischen Prozess- und Energieinformationen des WAAM-Prozesses, wurden auch statische Prozessinformationen erfasst und integriert. Hierzu wurde eine Schnittstelle entwickelt, durch die die relevanten Daten aus einer Datenbank des ERP-Systems ausgelesen werden können. Diese beinhalten Informationen zu Bauteilen (Bauteilnummer, -bezeichnung, Seriennummer, etc.) und dem zugehörigen Fertigungsauftrag (u.a. Auftragsnummer, -bezeichnung, Anzahl).

Über die gleiche Schnittstelle werden auch Daten für den nachgelagerten Prozessschritt „Fräsen“ ermittelt. Beim Fräsen werden neben der Anlagebezeichnung und dem verwendeten Kühlmittel weitere prozessspezifische Informationen und Vorgaben ausgelesen wie z.B. die

Fräszeit, ob ein Bauteil nur „teilgefräst“ ist sowie die Vorgabe, welches Gewicht das Bauteil nach dem Fräsvorgang haben soll.

Neben der Erfassung der Daten ist die konzeptionelle Erforschung einer flexiblen, skalierbaren Systemarchitektur, im Sinne eines übertragbaren Lösungsmuster, ein zentrales Ergebnis des APs für das Upscaling der Datenintegration. Um alle relevanten Aspekte für die Erfassung, Verknüpfung und Persistierung der Daten innerhalb des Unternehmens und der Fertigungsprozesse zu berücksichtigen, müssen die verschiedenen Arten von Daten sowie die unterschiedlichen Ebenen der Abstraktion durch Architekturkonzepte abgebildet werden. Hierzu hat verlinked, gemeinsam mit den Partnern, eine übertragbare Referenzarchitektur für die Datenintegration bei WAAM-Prozessen spezifiziert. Der Aufbau der Architektur ist in Abbildung 8 dargestellt.

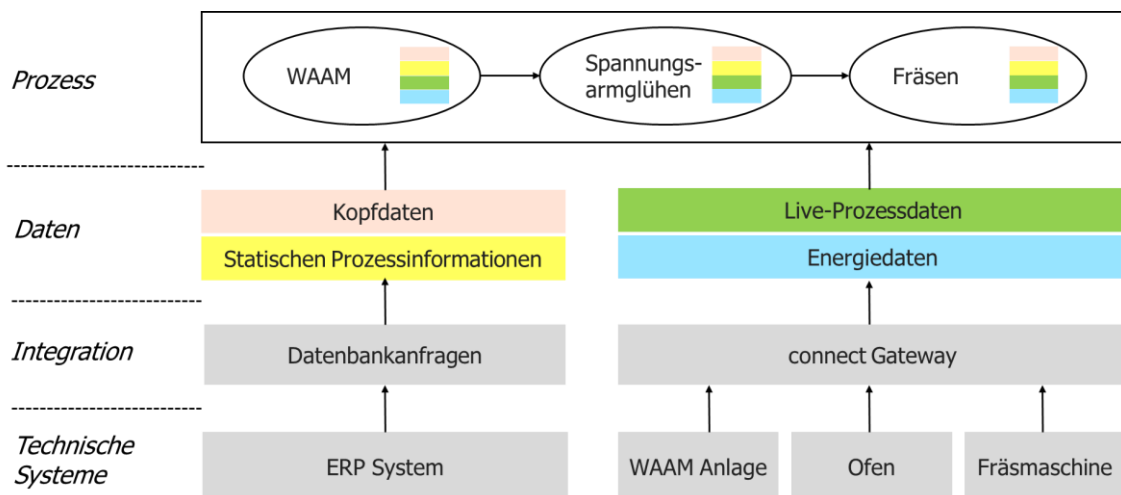


Abbildung 8: Referenzarchitektur für die Datenintegration bei WAAM-Prozessen

Auf der untersten Ebene werden die technischen Systeme betrachtet. Hierzu gehören zum einen Softwaresysteme, wie das ERP-System, in dem vorwiegend betriebswirtschaftliche Informationen zur Verfügung gestellt werden. Neben der Software werden bei den technischen Systemen auch Hardwaresysteme betrachtet, die den physischen Prozess abbilden. Hierzu gehören die WAAM-Anlage, sowie aus den nachgelagerten Prozessen der Ofen zum Spannungsglühen und die Fräsmaschine zur Nachbearbeitung.

Die datentechnische Anbindung der Systeme hängt von der Art des Systems ab. Softwaresysteme werden durch das Auslesen von Daten aus den entsprechenden Datenbanken angebunden. Hierbei kann der Zugriff über das direkte Auslesen durch SQL-Anfragestatements erfolgen oder über einen technisch entkoppelten Zugriff z.B. mithilfe einer REST-Schnittstelle, wenn diese von dem jeweiligen System zur Verfügung gestellt wird. Für die Erfassung von Daten an den Maschinen und Anlagen in der Fertigung, verwenden wir einen hochflexiblen und erweiterbaren Ansatz, prototypisch implementiert auf Basis des verlinked *connect-Gateway^{CX}*. Hierbei werden Adaptermodule verwendet, welche flexibel das Auslesen von Daten aus Steuerungen und Sensorik über unterschiedliche Protokolle (z.B. OPC UA, TCP, MQTT usw.) ermöglichen.

Bei den beschriebenen Ansätzen zur Integration werden vier unterschiedliche Kategorien von Daten unterschieden:

- Kopfdaten,
- statische Prozessinformationen,
- Live-Prozessdaten und
- Energiedaten.

Für die weiterführende Betrachtung und Verknüpfung bilden die semantisch und syntaktisch konsolidierten Datenmodelle auf dieser Ebene die Grundlage.

Auf der obersten Ebene der Systemarchitektur erfolgt die fachliche Verknüpfung der Daten. Hierfür werden diese mit dem digitalen Prozessabbild verknüpft. Zu den einzelnen Prozessen werden die jeweiligen Datenpunkte über die Zeit aggregiert, mit entsprechenden technischen Identifiern zusammengefasst und wieder abrufbar zur Verfügung gestellt.

Die Datenerfassung in der WAAM-Zelle wurde um eine Live-Ansicht erweitert. Auf Basis der Ergebnisse aus AP 4.2 sowie der KI-Strategien und-optimierungen aus AP 2.5 und AP 3.3 wurden Anforderungen für prozessspezifische Parameter identifiziert und Lösungen zur Erfassung der entsprechenden Datenpunkte installiert (Abbildung 9).

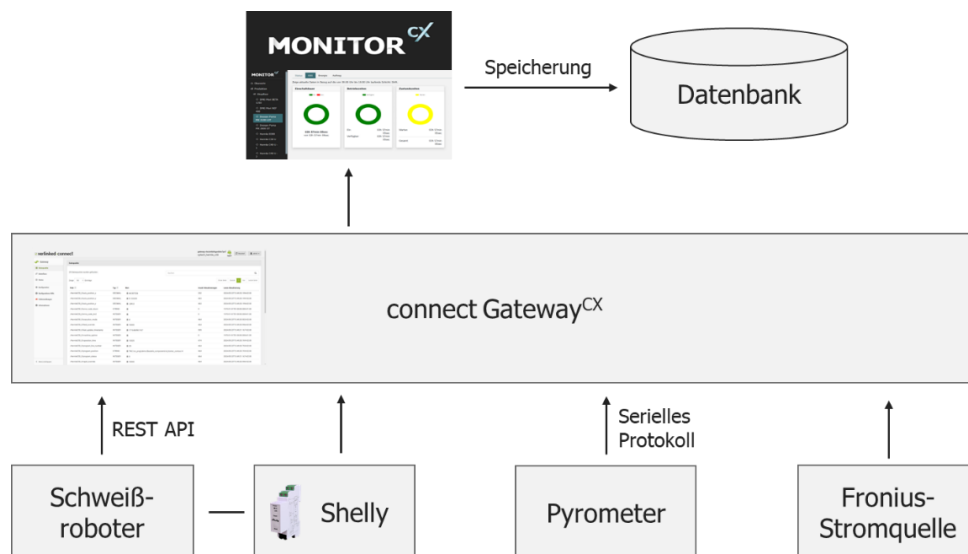


Abbildung 9: Erweiterte Datenintegration an der WAAM-Zelle

Durch die flexible Integrations-Middleware kann die Datenerfassung für veränderte Konfigurationen oder die Übertragung auf andere WAAM-Anlagen mit geringem Aufwand angepasst werden. Auswertung und Anzeige der Daten erfolgen beispielhaft über die Komponente Monitor^{CX}, in welcher die erfassten Werte automatisch in einer Datenbank gespeichert werden.

Ein weiterer Baustein des Upscalings der Datenintegration ist die Konzeption und Entwicklung von Konsistenzprüfungen. Wie in Abbildung 10 dargestellt, werden die Daten aus den Komponenten Pyrometer, Schweißroboter, Fronius-Stromquelle, Shelly sowie perspektivisch eines

der Beschleunigungssensors berücksichtigt. Die aus diesen Datenquellen erfassten Werte werden auf Modellebene über einen Zeitstempel miteinander verknüpft. Auf Basis der zeitlich korrelierten Daten wurden verschiedene Konsistenzprüfungen konzipiert und entwickelt. Wir unterscheiden drei Arten von Prüfungen, welche die relevanten Aspekte aus der Anforderungserhebung berücksichtigen:

- Formale Prüfung der syntaktischen Konsistenz und Korrektheit
- Überprüfung der fachlichen Konsistenz durch semantische Prüfungen
- Konsistenzprüfung auf Basis von Abhängigkeiten zwischen Parametern

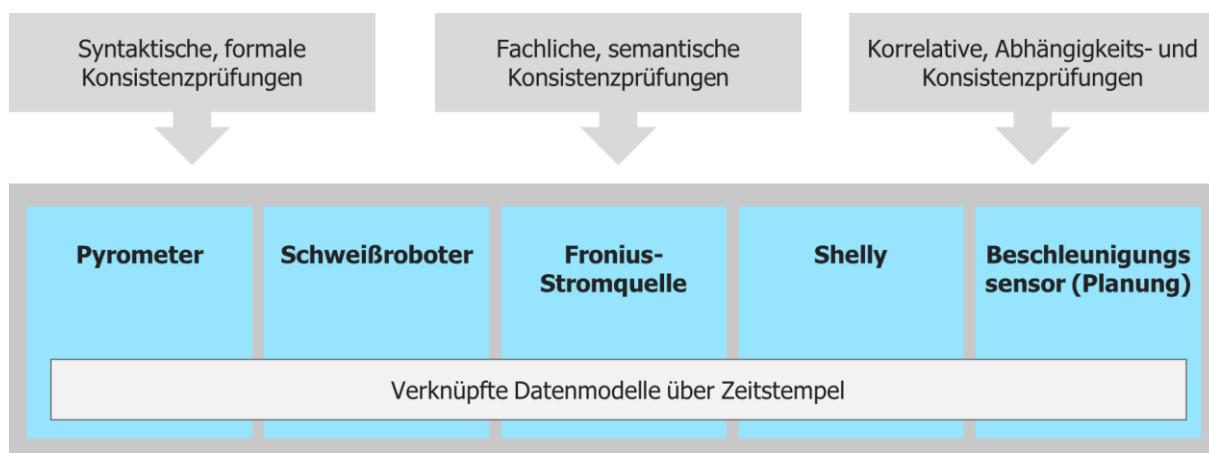


Abbildung 10: Konzeption von Datenkonsistenzprüfungen auf Basis verknüpfter Datenbestände

AP 4.2 – Auswahl KI-Strategien und Definition der Inputgrößen

Das Ziel der Arbeiten in AP 4.2 war die Erarbeitung von Grundlagen für den Aufbau einer horizontal digitalisierten Prozesskette. Hierzu gehören die Auswahl und Validierung von KI-Strategien zur WAAM-Bahnplanung sowie die Ableitung von relevanten Inputdatengrößen, welche über Schnittstellen in der digitalen Prozesskette bereitgestellt werden müssen.

Im ersten Schritt wurde ein systematisches Vorgehen zur Validierung von KI-Strategien entwickelt. Hierzu wurde mit den anderen Partnern ein Kriterienkatalog aufgestellt, um bestehende Strategien zu bewerten. Auf Basis der definierten Kriterien wurden bestehende KI-Verfahren evaluiert. Ein wesentlicher technisch-wissenschaftlicher Beitrag von verlinked war hierbei die datentechnische Analyse sowie die Identifikation und Bereitstellung der relevanten Inputdaten.

Zur Verknüpfung der Eingangsgrößen mit den jeweils relevanten Datenquellen wurde die digitale Prozesskette systematisch hinsichtlich geeigneter Datenpunkte analysiert. Auf Grundlage eines entsprechenden Mappings konnten die KI-Algorithmen anschließend mit dem virtuellen Prozessabbild gekoppelt werden. In einem weiteren Schritt wurden die hierfür erforderlichen Schnittstellen zunächst konzeptionell vorstrukturiert und im weiteren Projektverlauf zu einem konkreten Schnittstellenmodell ausdifferenziert.

Um die Daten für die algorithmische Einbindung in KI-Strategien aufzubereiten, wird ein Pre-Processing in drei Schritten von der Bereinigung, über die Transformation bis zur Reduktion und Aggregation der Daten durchlaufen. Auf Basis dieser Schritte wurden die Inputmodelle für die KI-Strategien gebildet. Der Prozess zur Erstellung der Datenmodelle ist in Abbildung 11 dargestellt.

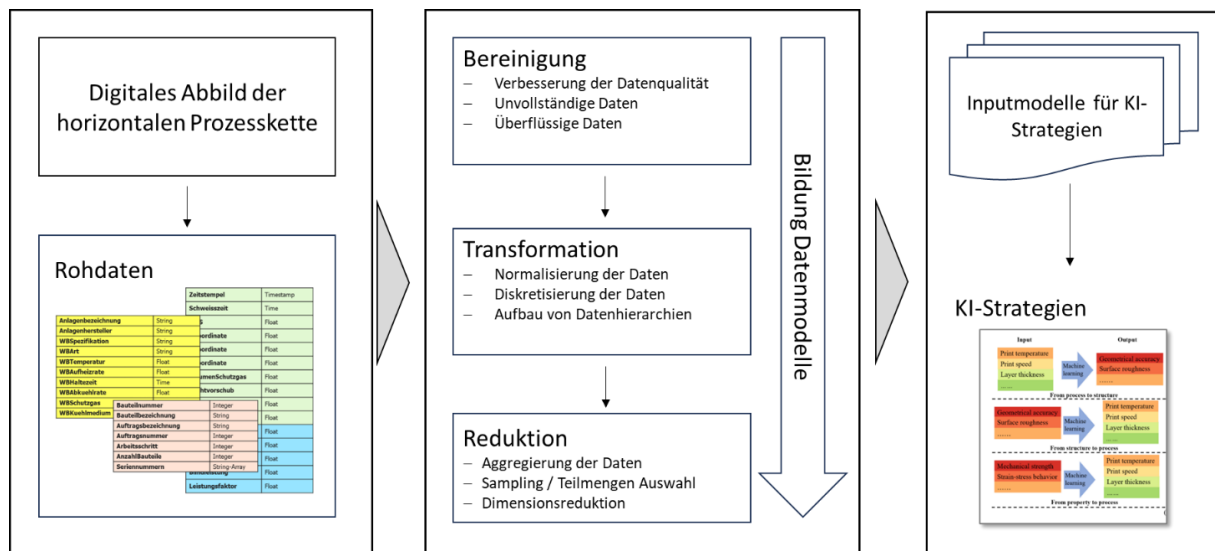


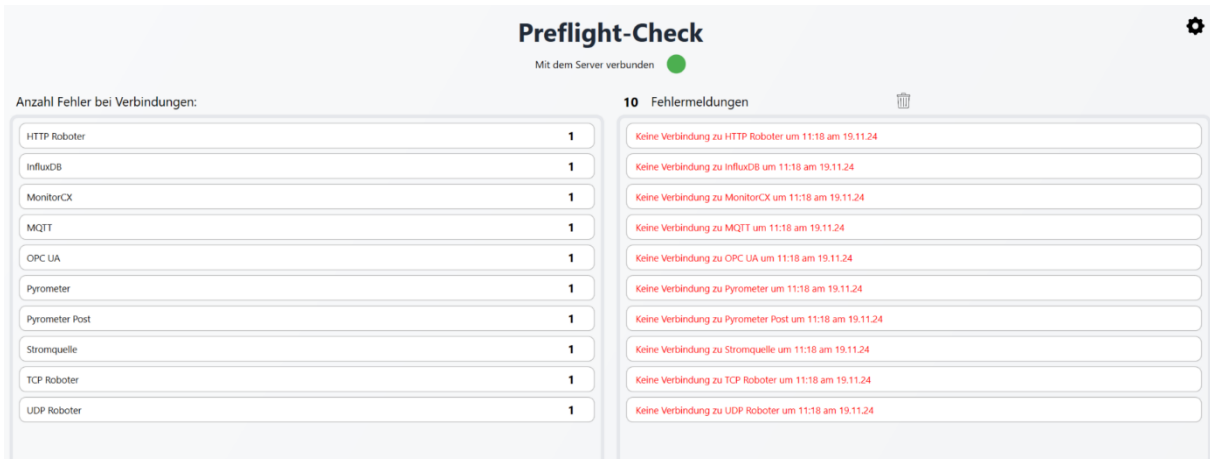
Abbildung 11: Erstellung von Datenmodellen für KI-Strategien

AP 4.3 – Validierung der digitalen Prozesskette und Definition des Prozessfensters für qualitätssichere Skalierbarkeit und Bauteilhomogenität

Schwerpunkt des Arbeitspaketes 4.3 war die Robustheitsprüfung der digitalen Prozesskette, insbesondere hinsichtlich der qualitätssicheren Produktion von Bauteilen mit veränderten Geometrien. Hierzu wurde gemeinsam mit den Partnern zunächst eine Identifizierung und Festlegung von relevanten Qualitätskriterien durchgeführt. Diese Kriterien dienen später als Grundlage für die Bewertung der digitalen Prozesskette. Auf Basis der abgestimmten Qualitätskriterien wurde mit der Konzeption der Validierungsexperimente begonnen.

Die Voraussetzung zur Durchführung einer belastbaren Robustheitsprüfung ist die durchgängige Überwachung des WAAM-Prozesses im Sinne einer lückenlosen Datenbasis. Hierzu wurde ein „Preflight-Check“ konzipiert und prototypisch implementiert. Dieser führt vor Beginn des Schweißprozesses eine Überprüfung aller Verbindungen zu datenrelevanten Komponenten durch, so dass sichergestellt ist, dass diese erreichbar sind und Daten korrekt übertragen werden können.

Hierdurch wird sichergestellt, dass die Datenerfassung sowie -speicherung fehlerfrei funktioniert und für jedes gefertigte Bauteil eine zugehörige Prozessdokumentation erstellt wird. Die Oberfläche des Preflight-Checks mit exemplarischen Fehlermeldungen ist in Abbildung 12 dargestellt.



Preflight-Check ⚙️

Mit dem Server verbunden ●

Anzahl Fehler bei Verbindungen:

HTTP Roboter	1
InfluxDB	1
MonitorCX	1
MQTT	1
OPC UA	1
Pyrometer	1
Pyrometer Post	1
Stromquelle	1
TCP Roboter	1
UDP Roboter	1

10 Fehlermeldungen 🗑️

- Keine Verbindung zu HTTP Roboter um 11:18 am 19.11.24
- Keine Verbindung zu InfluxDB um 11:18 am 19.11.24
- Keine Verbindung zu MonitorCX um 11:18 am 19.11.24
- Keine Verbindung zu MQTT um 11:18 am 19.11.24
- Keine Verbindung zu OPC UA um 11:18 am 19.11.24
- Keine Verbindung zu Pyrometer um 11:18 am 19.11.24
- Keine Verbindung zu Pyrometer Post um 11:18 am 19.11.24
- Keine Verbindung zu Stromquelle um 11:18 am 19.11.24
- Keine Verbindung zu TCP Roboter um 11:18 am 19.11.24
- Keine Verbindung zu UDP Roboter um 11:18 am 19.11.24

Abbildung 12: Benutzeroberfläche Preflight-Check

Zur durchgängigen Überwachung der Parameter hinsichtlich der definierten Prozessfenster sowie für die Dokumentation von entsprechenden Verletzungen der Parametergrenzen, wurde ein Tool zur Prozessparameter-Überwachung implementiert. Für jeden Wert kann ein Prozessfenster durch Definition eines unteren sowie eines oberen Grenzwertes definiert werden. Während des Schweißprozesses werden die aktuellen Werte durchgängig gegen dieses Prozessfenster geprüft.

Die Oberfläche des Überwachungstools ist in Abbildung 13 dargestellt. Im oberen Teil des User Interfaces ist die Liveanzeige der überwachten Prozesswerte. Ein Status-Icon zeigt an, ob der aktuelle Wert innerhalb oder außerhalb des definierten Prozessfensters liegt. Im unteren Teil der UI befindet sich eine konfigurierbare Anzeige für Warnmeldungen, welche in einer Liste mit Zeitstempeln angezeigt werden.

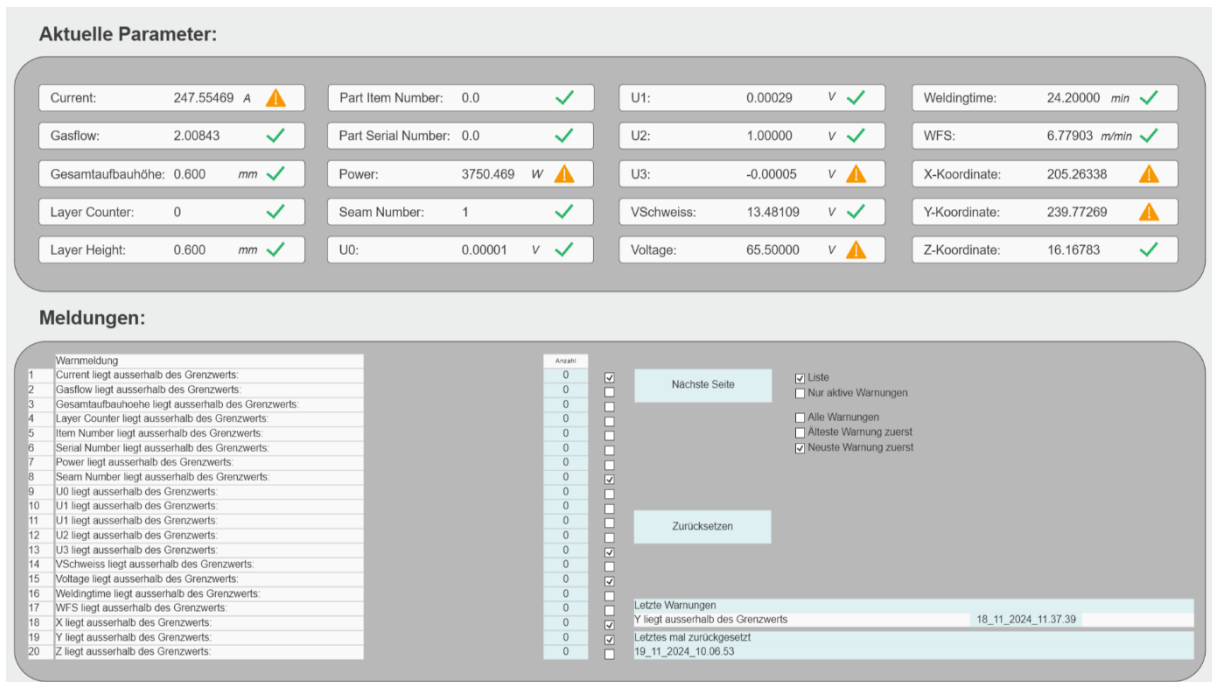


Abbildung 13: Tool zur Überwachung der Prozessparameter

In einem zweiten Schritt wurde die Prozesswert-Überwachung in ein Dashboard im Monitor^{CX} überführt. Darüber hinaus wurden die erforderlichen Grenzwerte als zusätzliche Parameter in die Robotersteuerung eingebunden. Dadurch konnte die bislang manuell Vorgabe von Grenzwerten durch eine bauteilabhängige, automatisierte Berechnung im Rahmen der Bahnplanung ersetzt werden. Die auf diese Weise ermittelten Grenzwerte werden gemeinsam mit den Bahn- und Daten an die Robotersteuerung übergeben. Zudem können die Grenzwerte bestimmt und zusammen mit den Prozessdaten für einen späteren Abruf aufgezeichnet werden.

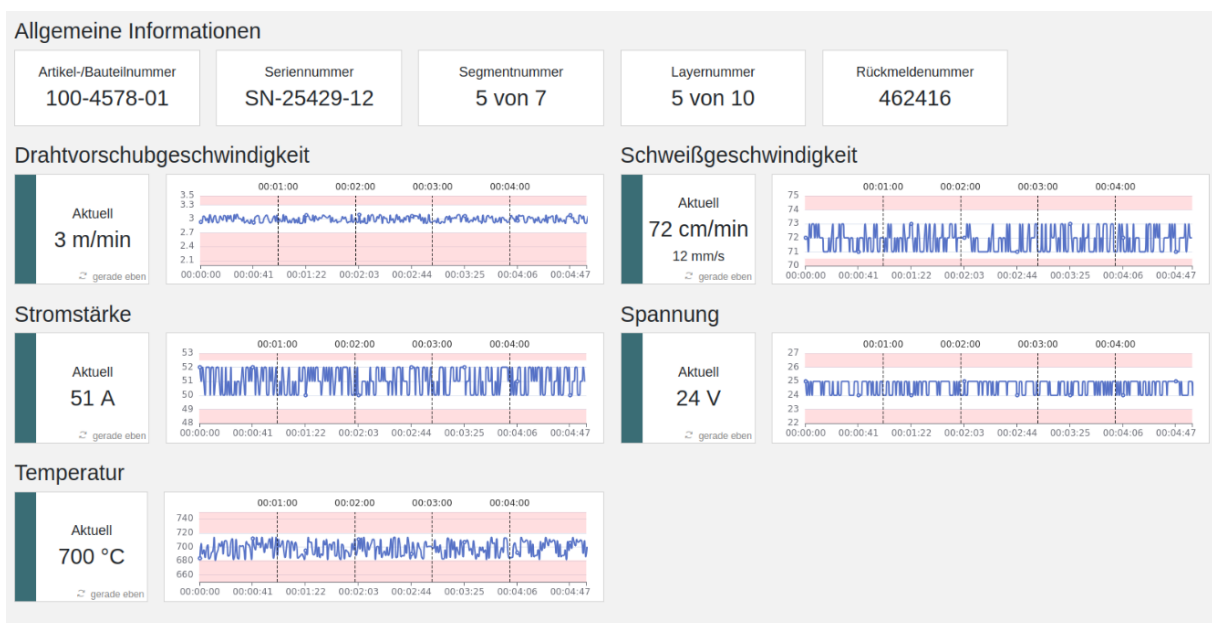


Abbildung 14: Dashboard zur Parameter-Überwachung in Monitor^{CX}

Aus sicherheitstechnischen Gründen ist ein Aufenthalt von Personal innerhalb der WAAM-Zelle während des Schweißprozesses nicht zulässig. Zur visuellen Überwachung wurden vier Kameras installiert, mit deren Hilfe die Abläufe innerhalb der WAAM-Zelle beobachtet werden können

Hierbei handelt es sich um drei Smart-Kameras des Typs Reolink RLC 843A (reolink_1 bis reolink_3) sowie um eine spezielle Thermographiekamera der Firma Therness. Die Video-streams sämtlicher Kameras werden über einen Frigate Network Video Recorder (NVR) aufgezeichnet, um eine nachträgliche Auswertung zu ermöglichen. Aufgrund des mit Videoaufzeichnungen verbundenen hohen Datenvolumens und des verfügbaren Speicherplatzes wurde die Vorhaltdauer der Aufzeichnungen auf sieben Tage begrenzt. Ältere Aufzeichnungen werden durch das System Frigate automatisiert gelöscht. Zur Überwachung des aktuellen Zustands innerhalb der WAAM-Zelle wurde ein Dashboard implementiert, auf dem die Live-Bilder der Kameras dargestellt werden (s. Abbildung 15). Die Bilddaten werden hierzu über Frigate bereitgestellt.

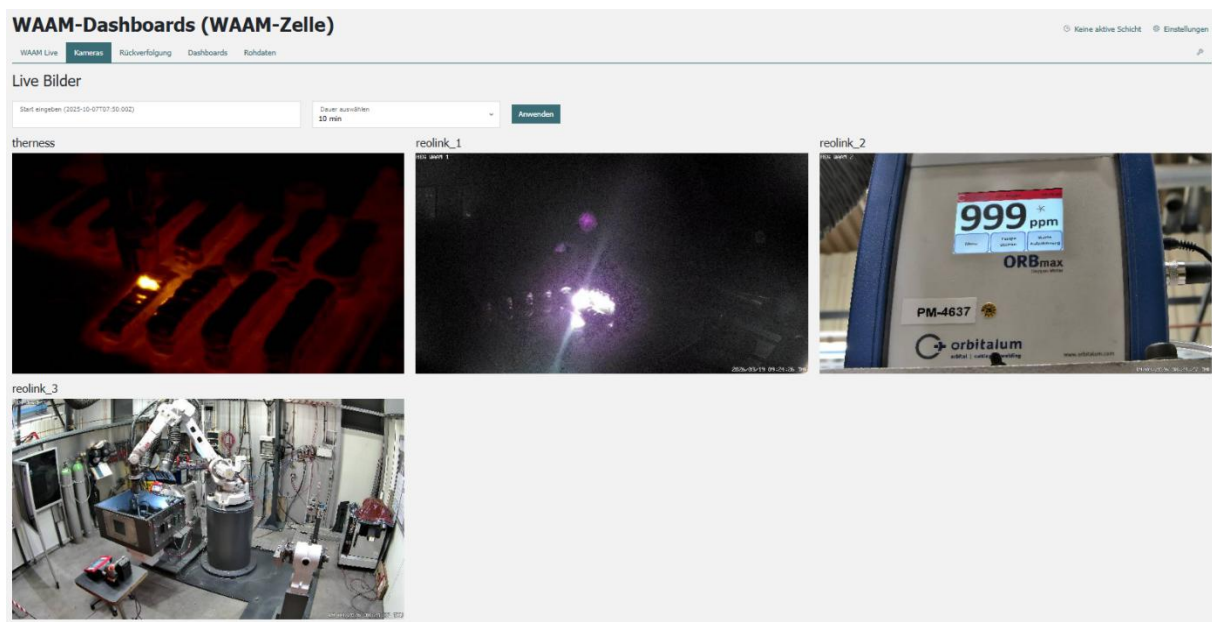


Abbildung 15. Dashboard mit Kameraansichten der WAAM Zelle

Die Kamera reolink_1 ist auf das jeweils zu fertigende Bauteil ausgerichtet. Kamera reolink_2 erfasst das innerhalb der WAAM-Zelle platzierte Messgerät zur Bestimmung des Restsauerstoffgehalts. Über Kamera reolink_3 kann der gesamte Innenraum der WAAM-Zelle eingesehen werden. Die Thermographiekamera der Firma Therness ist für die Ausrichtung auf das Schweißbad vorgesehen. Neben der Bildaufnahme ermöglicht sie zugleich die Temperaturmessung an frei konfigurierbaren Messpunkten. Perspektivisch ist vorgesehen, hierdurch das bislang eingesetzte Pyrometer zu substituieren.

In dem Dashboard besteht die Möglichkeit, einen Zeitpunkt sowie eine Zeitdauer auszuwählen. Über die Funktion „Anwenden“ kann anschließend die zugehörige Videosequenz aller vier Kameras synchronisiert wiedergegeben werden. Diese Funktionalität ist durch den in Frigate konfigurierten Aufzeichnungszeitraum von derzeit sieben Tagen begrenzt.

Für die qualitätssichere Skalierbarkeit von Bauteilen, ist das unterbrechungsfreie Fahren der Schweißbahnen die Grundvoraussetzung. Endet der Drahtvorrat auf einer Rolle innerhalb eines Segments der Schweißbahn, führt dies zwangsläufig zu Fehlstellen im Metallgefüge, welche die Stabilität des Bauteils beeinträchtigen. Je nach Größe der Fehlstellen können diese sogar der Grund dafür sein, dass ein Bauteil nicht verwendet werden kann.

Zur Sicherstellung eines unterbrechungsfreien Schweißvorgangs, wurde eine durchgängige Überwachung des Drahtverbrauchs konzipiert und implementiert, welche die Grundlage für die Überprüfung der Restlänge des Schweißdrahtes auf der aktuell verwendeten Rolle vor dem Start eines neuen Layers im Schweißvorgang bildet. In Abbildung 16 sind die Komponenten sowie die Kommunikationspfade zwischen ihnen dargestellt.

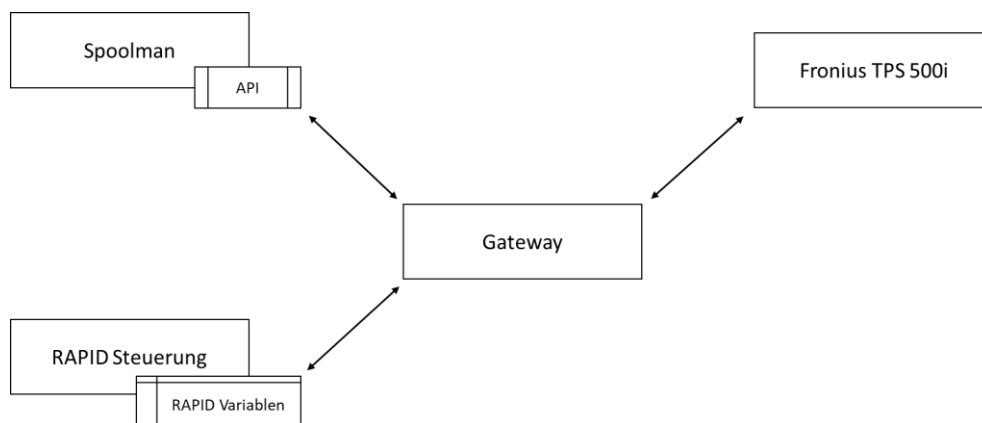


Abbildung 16: Komponentenstruktur der Schweißdrahtüberwachung

Zur Realisierung der Drahtlängenüberwachung musste ein komplexer Kommunikationsprozess zwischen den Komponenten umgesetzt werden. Der Ablauf ist im Sequenzdiagramm in Abbildung 17 skizziert.

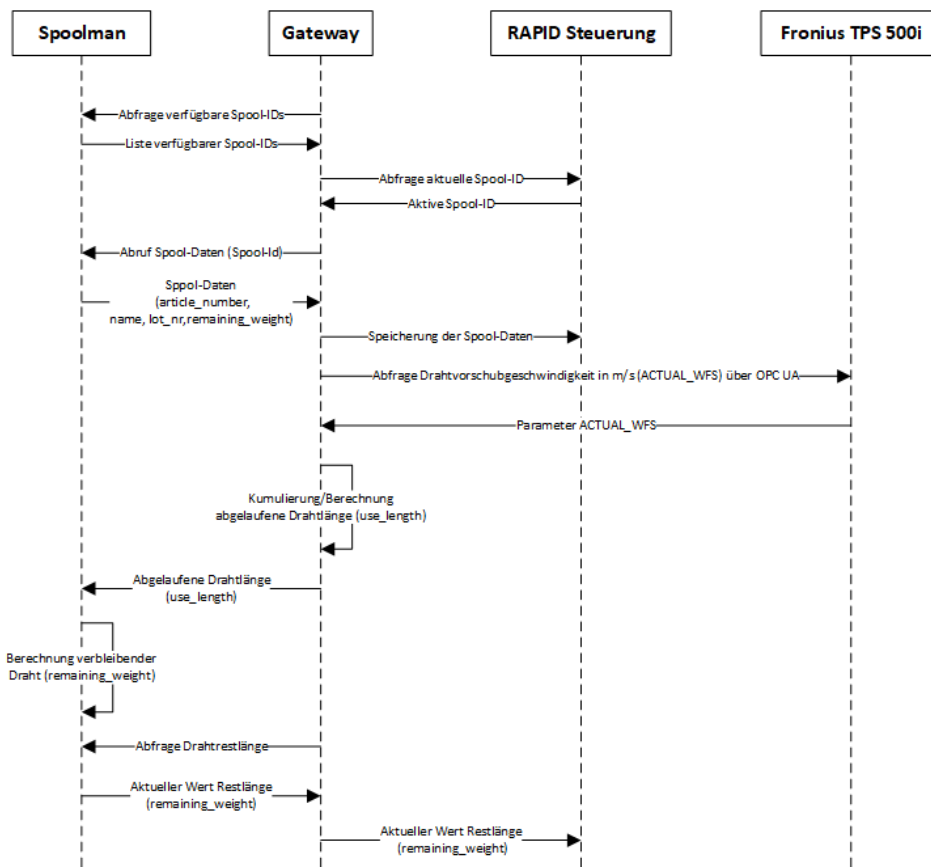


Abbildung 17: Sequenzdiagramm zur Überwachung des Drahtverbrauchs

Die Grundlage für die Überwachung des Drahtverbrauchs bildet die Spoolman-Filamentverwaltung, eine Open-Source-Software, die ursprünglich für die Verwaltung von Filament-Rollen bei 3D-Druckern konzipiert wurde. Spoolman bringt alle Voraussetzungen für die Verwaltung von Rollen mit und beinhaltet zudem Möglichkeiten zur Berechnung der Restlänge und des verbleibenden Gewichtes von Filament-Rollen. Über eine Web-Oberfläche können verschiedene Rollen und zugehörige Daten des darauf enthaltenen Filaments gespeichert werden. Spoolman stellt diese Daten über eine REST-API anderen Systemen zur Verfügung. Externe Systeme können verbrauchte Längen für einzelne Rollen melden, wodurch Spoolman Länge und Gewichte der zugehörigen Rolle automatisch anpasst. In Abbildung 18 ist die Oberfläche der Spoolman-Filament-Verwaltung dargestellt.

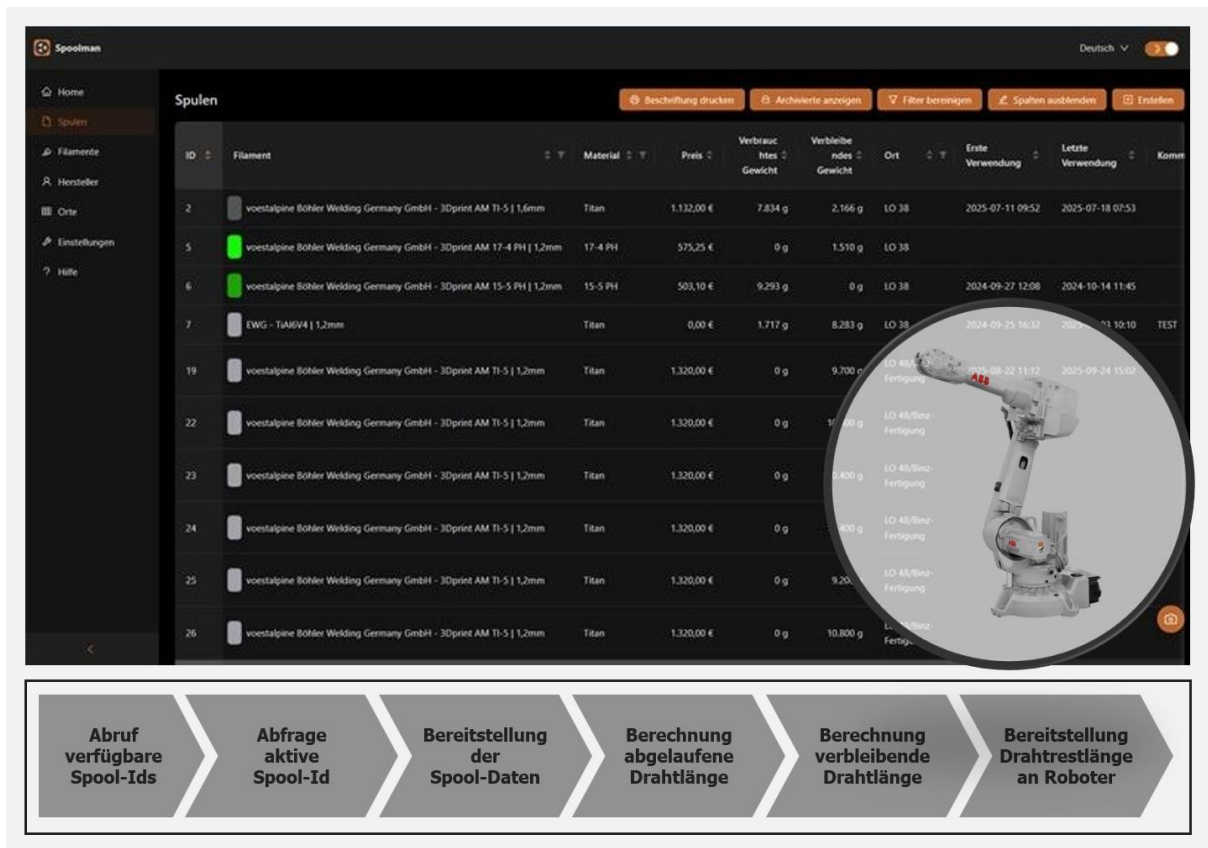


Abbildung 18: Oberfläche der Spoolman-Filament-Verwaltung

Zur Umsetzung des Überwachungsprozesses wird über die REST-API zyklisch eine Liste aller verfügbaren Rollen und derer Eigenschaftsdaten aus Spoolman ab und speichert sie intern. Das Roboterprogramm fragt die Liste verfügbarer Drahtrollen ab und erstellt hieraus eine Liste, aus welcher ein Benutzer über eine Bedienoberfläche direkt am Roboter die gerade aufgespannte Drahtrolle selektieren kann. Abbildung 19 zeigt diesen Auswahldialog.

Die zugehörige ID der ausgewählten Rolle wird nach der Auswahl an das *connect-Gateway*^{CX} gemeldet. Das *connect-Gateway*^{CX} beginnt daraufhin zyklisch die Drahtvorschubgeschwindigkeit am Roboterarm zu ermitteln, daraus einen Drahtverbrauch seit der letzten Abfrage zu berechnen und diesen an Spoolman zu übertragen. Spoolman passt damit die Restlänge auf der ausgewählten Rolle kontinuierlich an und gibt diese über die Eigenschaftsdaten der Rolle wieder zurück, und wird durch das Roboterprogramm zyklisch abgefragt.

Hierdurch erhält das Roboterprogramm fortlaufend aktualisierte Angaben über die noch verfügbare Drahtlänge und kann diese mit der voraussichtlich benötigten Länge für den nächsten, zu schweißenden Layer abgleichen. Unterschreitet die auf der Drahtrolle verfügbare Restmenge den für das Verschweißen eines vollständigen Layers erforderlichen Materialbedarf, wird durch die Robotersteuerung eine Warnmeldung ausgegeben. Dem Bedienpersonal wird dadurch ermöglicht, vor dem Start des nachfolgenden Layers rechtzeitig einen Rollenwechsel vorzunehmen. Auf diese Weise kann ein prozessbedingter Stillstand infolge einer während der Layerbearbeitung erschöpften Drahtrolle vermieden werden.

Zur Vereinfachung der Integration sowie zur effizienten Erprobung wurde der vollständige Datenaustausch in Form einer Bibliothek in RAPID-Code implementiert. Diese lässt sich mit geringem Integrationsaufwand in das Roboterprogramm einbinden.



Abbildung 19: Auswahldialog zur Auswahl einer Drahtrolle am Roboter

AP 4.4 – Datenanalyse, -komprimierung und -sicherung, Dokumentation und Wissensverwertung

Neben der Datenanalyse und -validierung war das Ziel der Arbeiten in AP 4.4 die Dokumentation des vollständigen Prozesses. Gemeinsam mit dem Partner Heggemann wurde eine Anforderungserhebung für die luftfahrtkonforme Datendokumentation durchgeführt. Hierzu wurden verschiedene rechtliche Rahmenbedingungen und Richtlinien untersucht und entsprechende Anforderungen an die Langzeitarchivierung abgeleitet. Diese Anforderungen bilden auch die Grundlage für die Implementierung und beispielhafte, technische Umsetzung zur Erzeugung einer luftfahrtgerechten Bauteil-Konformitätserklärung (CoC). Grundlage für eine durchgängige Dokumentation für die Luft- und Raumfahrt bildet die Norm „DIN EN 9300-100 - Langzeit-Archivierung und -Bereitstellung digitaler technischer Produktdokumentationen“ (LOTAR - **L**ong **T**erm **A**rchiving and **R**etrieval of digital technical product documentation).

Ausgehend von der LOTAR Norm wurden weitergehende konzeptionellen Arbeiten, insbesondere zur Auswahl und Aggregation von relevanten Parametern und Werten, aber auch zur Erhöhung der Übertragungssicherheit und -performance, durchgeführt.

Hierzu zählte insbesondere die Identifikation relevanter Schlüsselgrößen für eine dauerhafte Archivierung. Zu diesem Zweck wurden die aufgezeichneten Prozesswerte hinsichtlich ihrer

Relevanz für die Bauteilqualität bewertet. Dabei wurde die Anzahl der zu speichernden Parameter auf das notwendige Minimum reduziert und ausgewählte Parameterwerte in geeigneter Form aggregiert, ohne die Aussagekraft zur Beurteilung der Bauteilqualität zu beeinträchtigen. Auf diese Weise konnte der Speicherbedarf für die langfristige Vorhaltung der zugehörigen Daten signifikant reduziert werden.

Darüber hinaus wurde die Aufzeichnung von Prozessdaten mit Bedingungen verknüpft, so dass diese nicht pauschal, sondern automatisiert nur zu festgelegten Zeitpunkten erfolgen, in denen der eigentliche Fertigungsprozess des Bauteils stattfindet. Dadurch konnte eine weitere Reduzierung der aufgezeichneten Datenmenge erreicht werden.

Basierend auf den Konzepten zur Reduzierung des Speicherbedarfs wurden im nächsten Schritt gemäß den Vorgaben der DIN EN 9300-100 geeignete Datenformate ausgewählt, die lt. Norm für eine Langzeitspeicherung geeignet sind, und ein dreistufiges Konzept zur Langzeitdatenarchivierung erarbeitet.

Unternehmensweit wurden bei Heggemann drei Arten von Daten und Dokumenten identifiziert:

- a) Daten, die während der Herstellung eines Bauteils gesammelt, berechnet und aufgezeichnet werden. Diese Art der Daten wird im weiteren Verlauf „Prozessdaten“ genannt.
- b) Teile davon werden während der Fertigung herangezogen, um zu beurteilen, ob das gefertigte Bauteil seinen Qualitätskriterien entspricht. Wir sprechen hierbei von „qualitätsrelevanten Daten“. Diese Daten sind zwar größtenteils Bestandteil der Prozessdaten, ihnen kommt aber im weiteren Verlauf eine besondere Bedeutung zu.
- c) Dokumente, Modelldaten, Zeichnungen, etc., die für die Konstruktion und Herstellung eines Bauteils benötigt und in der Regel bereits vor Beginn der Fertigung erstellt werden. Diese bezeichnen wir als „Fertigungsunterlagen“.

Die vorgenommene Klassifikation wurde nicht ausschließlich auf den WAAM-Prozess ausgerichtet, sondern mit dem Ziel entwickelt, auf Daten und Dokumente sämtlicher Fertigungsprozesse des Unternehmens übertragbar zu sein. Für die identifizierten Datenarten wurden differenzierte Vorgaben hinsichtlich ihrer Aufbewahrungsdauer definiert. Für reine Prozessdaten wird davon ausgegangen, dass diese nach Abschluss der Bauteilfertigung nur noch in Einzelfällen, etwa zu Zwecken der Prozessoptimierung oder Fehleranalyse, herangezogen werden. Vor diesem Hintergrund wurde ein Aufbewahrungszeitraum von zwei Jahren als ausreichend bewertet. Während dieses Zeitraums werden die Daten in der produktiven Datenbank vorgehalten und anschließend gelöscht.

Darüber hinaus bestehen in der Luft- und Raumfahrtindustrie besondere Anforderungen an diejenigen Daten, die für die Beurteilung der Bauteilqualität maßgeblich sind. In diesem Kontext muss die Qualität eines Bauteils gegenüber dem Kunden mindestens über dessen gesamte Lebensdauer (Life of Product, LOP) sowie darüber hinaus nachweisbar bleiben. Die DIN 9130 („Luft- und Raumfahrt – Qualitätsmanagement – Aufbewahren von Aufzeichnungen“) sieht für derartige qualitätsrelevante Daten eine Aufbewahrungsdauer von LOP zuzüglich sechs Jahren vor. Gleiches gilt für Fertigungsunterlagen, sofern diese als Grundlage für die Bewertung der Bauteilqualität dienen.

Auf dieser Basis wurden die identifizierten Daten- und Dokumenttypen verschiedenen Archivierungsklassen zugeordnet, für die jeweils geeignete Aufbewahrungsformen, Archivierungsprozesse und Aufbewahrungszeiträume festgelegt wurden. Hieraus wurde eine dreistufige Archivierungsstrategie abgeleitet, wie sie in Abbildung 20 dargestellt ist. Der Beginn des Archivierungszeitraums wurde auf den Abschluss eines Fertigungsauftrags festgelegt. Im Anschluss daran sollen die zu archivierenden Daten automatisiert und normkonform gemäß DIN EN 9300-100 aus der Datenbank extrahiert und in ein für die Langzeitarchivierung geeignetes Datenformat überführt werden.

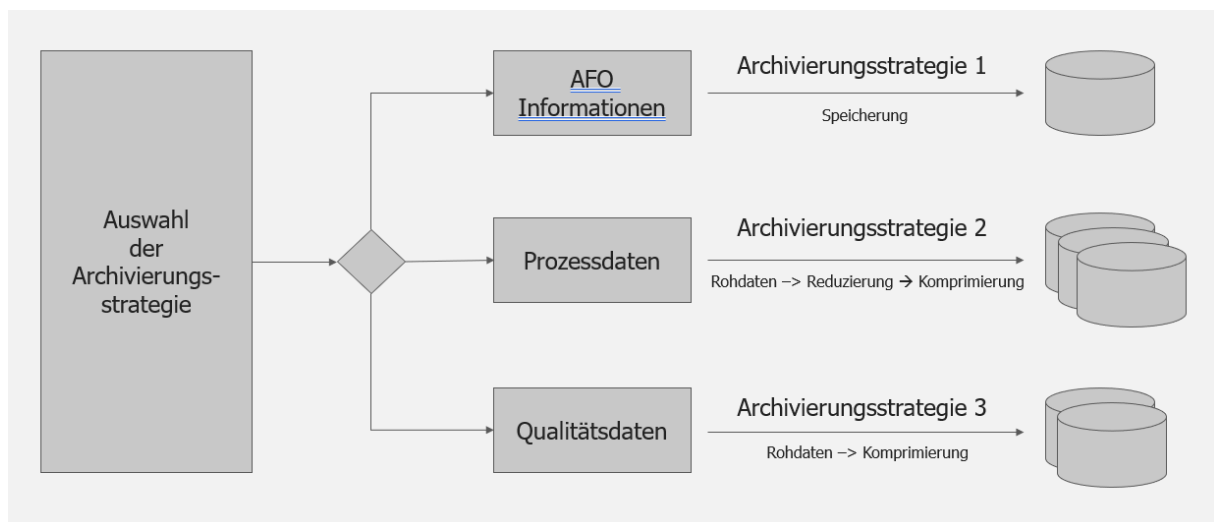


Abbildung 20: Dreistufige Archivierungsstrategie für Unternehmensdaten und -dokumente

Qualitätsrelevante Daten sollen zusätzlich aus der Datenbank exportiert und in einer Archivdatei abgelegt werden. Diese Archivdatei soll entsprechend den Vorgaben der DIN EN 9300-100 in einem offenen, textbasierten Dateiformat vorliegen. Zur Reduzierung des Speicherbedarfs kann ergänzend eine Komprimierung unter Verwendung etablierter Verfahren, beispielsweise im ZIP-Format, erfolgen.

Die langfristige Ablage sowohl der PDF-Dokumente als auch der erzeugten ZIP-Archive soll in der unternehmenseigenen ERP-Datenbank erfolgen. Ausschlaggebend hierfür ist, dass in diesem System bereits geeignete Mechanismen zur Datensicherung und dauerhaften Vorhaltung vorhanden sind.

Als weiteres Werkzeug zur Validierung der Prozessdaten an der WAAM-Zelle wurde ein Dashboard zur Rückverfolgung aufgezeichneter Prozessdaten erstellt. Aufgezeichnete Fertigungsdaten zu einem WAAM-Bauteil können damit rückwirkend abgerufen und analysiert werden.

Das Dashboard ermöglicht Layer-bezogene Ansichten qualitätsrelevanter Parameter. Durch eine graphische Darstellung wird eine Analyse und ein Vergleich der Daten mit anderen identischen Bauteilen wesentlich vereinfacht. Unterschiede in den Fertigungsabläufen lassen sich so leichter erkennen und zeigen Stellen auf, an denen potentiell Qualitätsmängel auftreten und für die sich ggf. nachträgliche Untersuchungen des Bauteils lohnen. Abbildung 21 zeigt das Dashboard mit entsprechenden Prozesswert-Kennlinien.

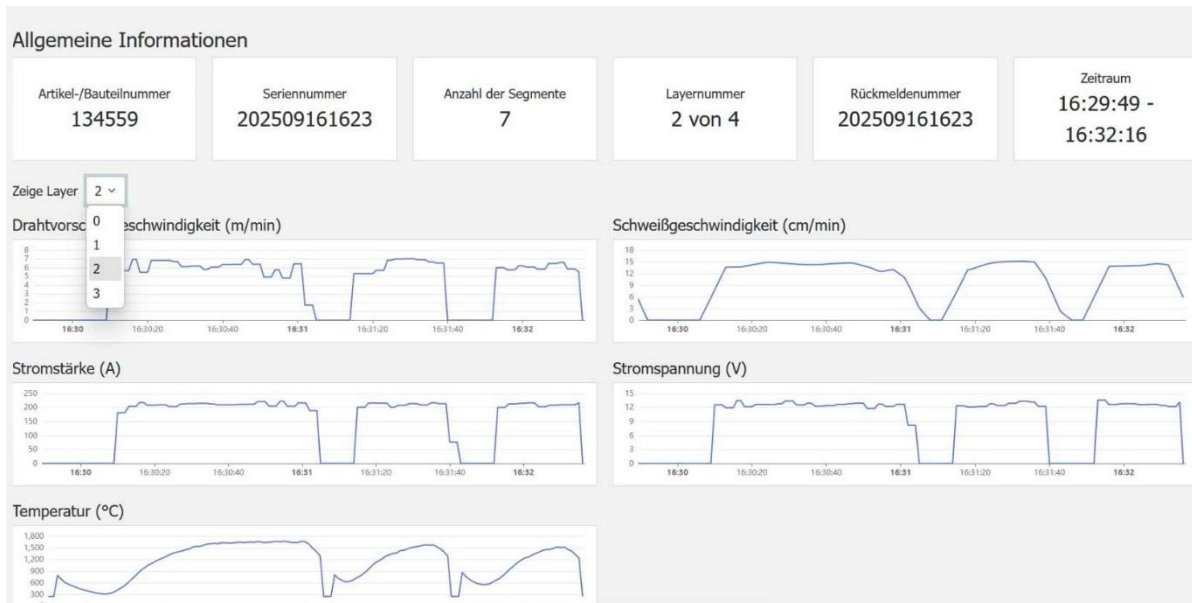


Abbildung 21: Dashboard zur Rückverfolgung von Prozessdaten eines WAAM-Bauteils

Um Analysen von Prozessdaten eines gefertigten WAAM-Bauteils auch durch externe Tools und Umgebungen zu ermöglichen, wurde zudem eine REST-API entwickelt und bereitgestellt. Dieses bietet die Möglichkeit, Fertigungsparameter und Prozessdaten eines WAAM-Bauteils abzufragen, grafisch aufzubereiten und die erweiterten Möglichkeiten externer Tools zur Datenanalyse zu verwenden. Abbildung 22 zeigt eine Beschreibung des REST-APIs im OPEN-API-Beschreibungsformat.

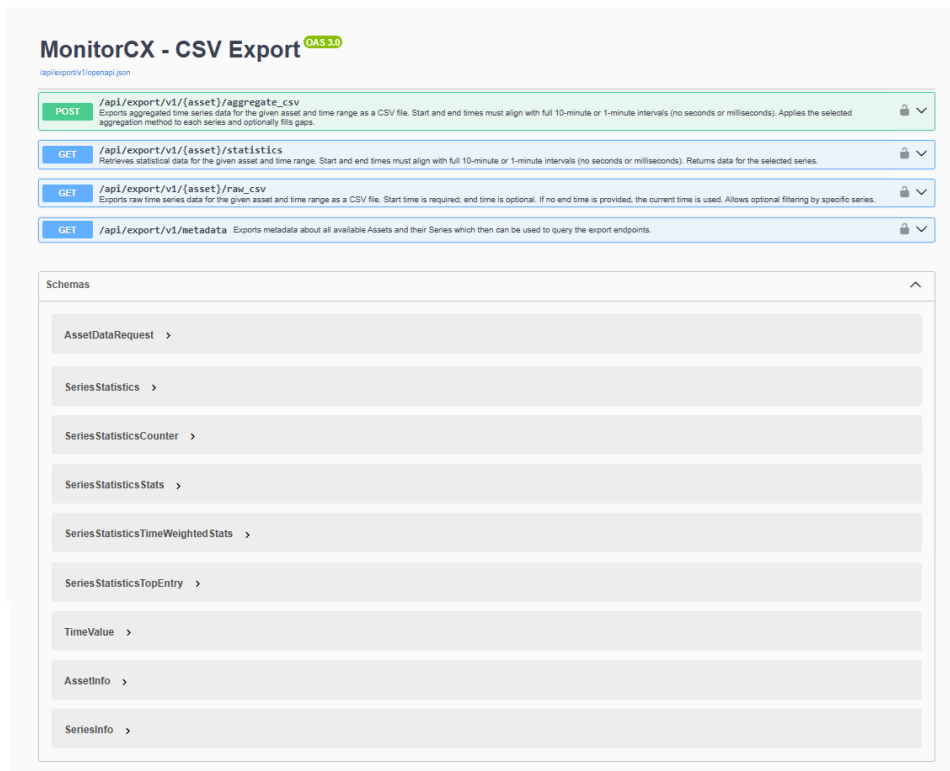


Abbildung 22: Open-API-Dokumentation des REST-APIs

In Abbildung 23 ist eine graphische Anzeige von WAAM-Bauteildaten exemplarisch dargestellt. Die Visualisierung beinhaltet die berechneten Werte für den zurückgelegten Weg, die Geschwindigkeit und Beschleunigung des Roboterarms (links) sowie der Verfahrweg (rechts).

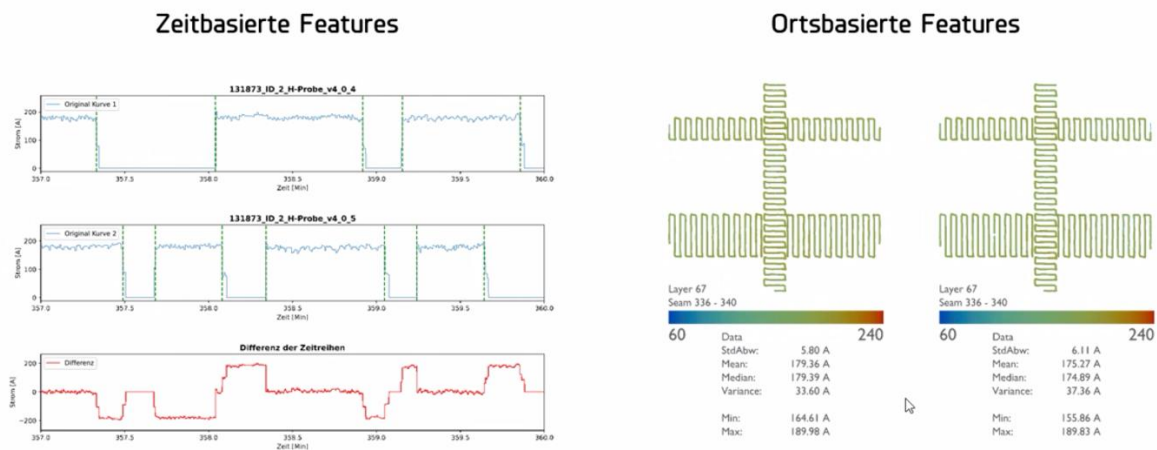


Abbildung 23: Visualisierung von WAAM-Bauteildaten in einem externen Tool

7. Zusammenfassung der Projektergebnisse

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden wesentliche wissenschaftlich-technische Ergebnisse zur Digitalisierung, datenbasierten Absicherung und qualitätsgerechten Skalierung des additiven WAAM-Fertigungsprozesses erzielt. Ein zentrales Projektergebnis besteht in der Konzeption, Umsetzung und Validierung einer skalierbaren, digitalisierten Prozesskette für die WAAM-basierte Fertigung. Damit konnte eine durchgängige digitale Abbildung des Fertigungsprozesses realisiert werden, die eine systematische Erfassung, Verknüpfung und Auswertung prozessrelevanter Informationen über die gesamte horizontale Prozesskette hinweg ermöglicht.

Ein wesentlicher wissenschaftlich-technischer Beitrag des Vorhabens liegt in der Erforschung und prototypischen Umsetzung einer Systemarchitektur für eine hochperformante und durchgängige Datenintegration. In diesem Zusammenhang wurden komplexe Datenstrukturen aus heterogenen Datenquellen erfasst, konsolidiert und in einem übergreifenden digitalen Prozessmodell zusammengeführt. Hierdurch konnte die Grundlage für eine konsistente datengetriebene Beschreibung des WAAM-Prozesses geschaffen werden, die sowohl technische Prozessdaten als auch qualitätsrelevante und auftragsbezogene Informationen integriert.

Darüber hinaus wurde die digitale Prozesskette zur Absicherung des WAAM-Prozesses genutzt. Hierzu zählen insbesondere die Überwachung definierter Prozessfenster, die Erfassung und Bewertung qualitätsrelevanter Parameter sowie deren Verknüpfung mit Auftrags- und Fertigungsdaten. Auf diese Weise konnten Voraussetzungen für eine verbesserte Prozesssteuerung, eine erhöhte Transparenz des Fertigungsverlaufs sowie eine belastbare Nachvollziehbarkeit der Prozesszustände geschaffen werden.

Ein weiteres Ergebnis ist die Bereitstellung geeigneter Eingangsgrößen und Datenmodelle für die ML-basierte Optimierung der Frässtrategie in nachgelagerten Bearbeitungsschritten. Damit wurden wesentliche Grundlagen für den Einsatz datengetriebener Verfahren zur Verbesserung der Prozessplanung und zur weiteren Automatisierung der Fertigung erarbeitet. Ergänzend hierzu wurde eine Edge-Analytics-Lösung konzipiert und prototypisch implementiert, die einen Pre-Flight-Check sowie die laufende Überwachung zentraler Prozessparameter umfasst. Die erzielten Ergebnisse zeigen, dass hierdurch ein Beitrag zur Erhöhung der Prozessstabilität und zur Verbesserung der Bauteilqualität geleistet werden kann.

Zur Unterstützung des Fertigungsbetriebs wurden außerdem Verfahren zur Visualisierung von Prozessdaten sowie zur Live-Überwachung des Prozesses durch Kameraintegration realisiert. Dies ermöglicht dem Bedienpersonal eine zeitnahe Beurteilung des Prozessablaufs und schafft die Grundlage für ein frühzeitiges Erkennen prozesskritischer Abweichungen. Für die qualitätsgesicherte Skalierbarkeit der gefertigten Bauteile wurde eine Schweißdrahtüberwachung entwickelt, in die digitale Prozesskette integriert und erfolgreich validiert. Damit konnte ein weiterer Beitrag zur Erhöhung der Prozesssicherheit und zur Vermeidung qualitätsbeeinträchtigender Prozessunterbrechungen erbracht werden.

Im Themenfeld Nachhaltigkeit wurde zudem eine Methodik zur Berechnung des CO₂-Fußabdrucks WAAM-gefertigter Bauteile erforscht. Darüber hinaus wurde eine chargenbasierte

Rückverfolgbarkeit der gefertigten Bauteile umgesetzt, um eine durchgängige Zuordnung material-, prozess- und auftragsbezogener Informationen zu ermöglichen. Ergänzend hierzu erfolgte die Konzeption und prototypische Entwicklung einer luftfahrtkonformen Langzeitarchivierung auf Grundlage der DIN 9130. Dadurch wurden wesentliche Voraussetzungen für die normgerechte, langfristige und qualitätsgesicherte Aufbewahrung relevanter Fertigungs- und Qualitätsaufzeichnungen geschaffen.

8. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Ausgaben:

Im Projekt fielen Personalausgaben sowie Kosten für vorhabensbezogene Abschreibungen an, siehe zahlenmäßiger Nachweis mit Belegliste. Da ein Nachweis der projektspezifischen Verwaltungskosten nicht mit vertretbarem Aufwand möglich war, wurden diese nicht geltend gemacht.

Reiseausgaben: Die angefallenen Reiseausgaben wurden nicht abgerechnet, sondern von verlinked getragen.

Einnahmen:

Es gab keine Einnahmen im Projektkontext.

9. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die von verlinked im Rahmen des Projekts geleistete Arbeit war notwendig und angemessen. Aufgrund des hohen konzeptionellen und technischen Anspruchs der Projektziele bestanden große Risiken für die erfolgreiche Umsetzbarkeit sowie die daraus folgende wirtschaftliche Verwertung. Für ein kleines Unternehmen wie die verlinked GmbH, war es nicht möglich diese Aufwände vor dem Hintergrund der bestehenden Risiken aus eigenen Mitteln zu realisieren. Aus diesem Grund war die Projektförderung für die Durchführung der Forschungsaufgaben erforderlich.

Mit den durchgeführten Arbeiten und den erforschten Konzepten wurden die Grundlagen für die erfolgreiche wirtschaftliche Verwertung gelegt. Für die Produktisierung und die Übertragung der Ergebnisse in die industrielle Praxis sind weitere umfangreiche Entwicklungsarbeiten erforderlich.

10. Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere bzgl. Verwertbarkeit der Ergebnisse

Aufgrund des erfolgreichen Projektverlaufs sowie der innovativen und validierten Ergebnisse ergeben sich für die Verwertung der erforschten Lösungen verschiedene Perspektiven. Im Fokus stehen hierbei die Konzepte und die erforschten Technologien im Rahmen der Systemreferenzarchitektur. Diese Forschungsergebnisse werden von verlinked zu einem Angebot von Beratungs- und Entwicklungsdienstleistungen für die Digitalisierung additiver Fertigungsprozesse abgeleitet.

Im Rahmen des Projektes wurden verschiedene luftfahrt- und WAAM-spezifische Komponenten prototypisch entwickelt. Diese beinhalten vor allem Adapter zur Datenerfassung und Visualisierungs- sowie Analysekomponenten. Für die wirtschaftliche Verwertung dieser erforschten Technologien sollen die Prototypen zu produktiv einsetzbaren Modulen weiterentwickelt werden und in die bestehenden Produkte connect-Gateway^{CX} und Monitor^{CX} integriert werden. Hierdurch entstehen für diese Produkte neue Absatzmärkte in den Kundensegmenten der Luft- und Raumfahrtindustrie.

Die konzipierte Edge Analytics Lösung soll weiterentwickelt und als ein neues Produkt vermarktet werden. Eine Analyse hat gezeigt, dass die neueste Steuerungsgeneration PLCnext (<https://www.plcnext-community.net/>) der Firma Phoenix Contact eine geeignete Hardware-Plattform bietet, welche durch ein App-Konzept auch die Implementierung und Ausführung in einer Hochsprache ermöglicht. Für die wirtschaftliche Vermarktung einer entsprechenden App bietet der PLCnext Store (<https://www.plcnextstore.com/eu/>) eine digitale Vertriebsplattform mit einer großen Reichweite in der relevanten Zielgruppe.

11. Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Während der Durchführung des Innovationsprojekts „QuSAM“ sind keine relevanten Fortschritte oder parallelen Forschungen bei anderen Stellen bekannt geworden, die in direkter Konkurrenz zu den wissenschaftlichen Fragestellungen des Vorhabens stehen.

Es gibt umfangreiche, allgemeine Forschungsarbeiten im Bereich der Digitalisierung von Fertigungsprozessen. In dem spezialisierten Kontext des QuSAM Projektes und unserer Forschungsarbeiten zur additiven Herstellung von hochfesten Titanstrukturen für die Luftfahrtindustrie und die damit verbundenen Digitalisierungs- und Optimierungsfragestellungen, sind keine anderen inhaltlich relevanten Fortschritte bekannt geworden.

12. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses

Die Veröffentlichung aller abschließenden Projektergebnisse des Teilprojekts von verlinked sowie des Verbundprojekts erfolgt erstmalig mit diesem Abschlussbericht. Zielstellungen des Projekts „QuSAM“ sowie entsprechende Zwischenergebnisse wurden von verlinked auf den Produktionstagen 2025 in Saarbrücken präsentiert.

Seit dem 4. Quartal 2025 werden ausgewählte Projektergebnisse auf der Homepage der verlinked GmbH (www.verlinked.com) präsentiert und für Unterlagen zur kommerziellen Verwertung der Projektergebnisse aufbereitet.