

Bochum, 31.03.2026

**Verbundvorhaben H2Giga_QT5.1_HyPLANT100:
Entwicklung optimierter und automatisierter
Abläufe und Standards für den Aufbau
großskaliger Wasserelektrolyseure;
Teilvorhaben: Flexibilisierung des Automatisierungs-
und Roboterprogrammierungsprozesses
bei Hybriden Montagesystemen**

Sachbericht zum Verwendungsnachweis - Teil II: Eingehende Darstellung

Stand:	31.03.2026
Einreichungsdatum TIB (Teil I+II):	31.03.2026
Partnerin/Partner:	Ruhr-Universität Bochum - Fakultät für Maschinenbau - Lehrstuhl für Produktionssysteme, Prof. Dr.-Ing. Bernd Kuhlenkötter
Autorinnen/Autoren:	Patrick Adler, Lukas Christ, Daniel Syniawa, Malte Jakschik, Simon Krieger, Alfred Hypki, Bernd Kuhlenkötter
Fördertitel:	Verbundvorhaben H2Giga_QT5.1_HyPLANT100: Entwicklung optimierter und automatisierter Abläufe und Standards für den Aufbau großskaliger Wasserelektrolyseure, Teilvorhaben Flexibilisierung des Automatisierungs- und Roboterprogrammierungsprozesses bei Hybriden Montagesystemen
Laufzeit:	01.04.2021 bis 31.12.2025
Förderkennzeichen:	03HY114B
Disclaimer:	Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Forschung, Technologie
und Raumfahrt



Finanziert von der
Europäischen Union
NextGenerationEU

Teil II. Eingehende Darstellung (wird veröffentlicht)

1. Eingehende Darstellung der durchgeführten Arbeiten und Ergebnisse

Das Ziel des LPS-Teilvorhabens ist die roboter- und Mensch-Roboter-Kollaborations-gestützte Montage in der hybriden Produktion von großskaligen Elektrolyseuren im H₂Giga-Projekt HyPLANT100. Es fokussiert sich auf die Entwicklung und Umsetzung einer durchgängigen Methodik zur vollständigen Produktionssimulation, zur Realisierung hybrider Montagesysteme sowie zur Implementierung selbstkonfigurierender Roboterprogramme und MRK-Aufgabenverteilungen. Wichtige Kriterien sind eine konsistente Datenstrukturierung und -haltung zur Anlagen- und Ablaufplanung in der Produktion von großskaligen Elektrolyseuren von ein bis zwei Gigawatt elektrischer Anschlussleistung.

Das zentrale Ziel dieses Teilprojekts ist die Umsetzung der Wertschöpfungskette von der Simulation bis zur Inbetriebnahme der Montage von Kabinetten sowie der großskaligen Elektrolyseur-Gesamtsysteme. Dieses Ziel untergliedert sich im Wesentlichen in drei Teilziele: die Realisierung geeigneter Simulationsmöglichkeiten, die Konfiguration von hybriden Montagesystemen sowie den notwendigen durchgängigen Datenaustausch entlang der Wertschöpfungskette.

Bei der Realisierung der Simulation ist ein zentrales Ziel, dass die entwickelten Konzepte möglichst allgemeingültig sind und dadurch eine hohe Übertragbarkeit auf andere Problemstellungen ermöglichen. Aufgrund der unterschiedlichen Szenarien der Kabinett-Montage und der Montage der Gesamtsysteme ergeben sich unterschiedliche Anforderungen an die Simulation, woraus sich eine ideale Umgebung zur Validierung dieses Teilziels ergibt. Ein weiterer Aspekt dieses Teilziels ist die Weiternutzung existierender Software-Werkzeuge, sodass keine Doppelentwicklungen durchgeführt werden, sondern gezielt Methoden und Erweiterungen entwickelt werden, um die Integration der Konzepte in einem möglichst breiten Anwendungsspektrum zu realisieren.

Die Konfiguration der hybriden Montage umfasst die Ableitung aller relevanten Informationen für eine spezifische Montageaufgabe. Diese Informationen umfassen Sicherheits- und Effizienzaspekte, Montage- und Prozessvarianten sowie die Erstellung von Roboter- und Steuerungsprogrammen. Es wird eine möglichst automatische Ableitung der Informationen mit einem nachgelagerten Assistenten angestrebt. Der Assistent soll den Nutzer bei der Auswahl verbleibender Optionen unterstützen und die jeweiligen Auswirkungen auf die Gesamtkonfiguration visualisieren.

Das Teilziel des durchgängigen Datenaustauschs soll in diesem Teilprojekt weiter vorangetrieben werden. Dabei soll wenigstens ein bidirektionaler Austausch aller im Gesamtprojekt relevanten Informationen realisiert werden. Auf Basis des AutomationML-Standards sollen alle Software-Systeme gekoppelt werden.

AP1: Simulation von Aufbaustrukturen großskaliger Elektrolyseursysteme

Kurzzusammenfassung:

Das erste Arbeitspaket legte den Schwerpunkt auf die Entwicklung und Umsetzung von Simulationsansätzen zur Abbildung von Planungs- und Produktionsprozessen großskaliger Elektrolyseuranlagen. Ziel war es, die Auslegung, Planung und Montage von Elektrolyseursystemen unterschiedlicher Skalierung digital abzubilden, um eine höhere Planungsqualität, kürzere Entwicklungszeiten sowie eine verbesserte Übertragbarkeit auf andere Anlagenkonzepte zu ermöglichen. Zu Beginn wurden Anforderungen an eine modulare und standardisierte Datenhaltung definiert, die eine durchgängige Nutzung der im Engineering erzeugten und im Produktionsprozess verwendeten Informationen gewährleistet. Grundlage

hierfür ist ein standardisiertes Datenformat, das alle relevanten Produkt- und Prozessdaten konsistent beschreibt und den Austausch zwischen verschiedenen Simulationstools, Planungssystemen und Engineering-Umgebungen ermöglicht. Die konkrete Umsetzung sowie die Datenmodellierung werden im folgenden Arbeitspaket 2 (AP2) detailliert beschrieben. Ein weiterer zentraler Bestandteil war die Umsetzung relevanter Teilsimulationen, wobei im beschriebenen Teilvorhaben der Fokus auf den Planungs- und Produktionsprozessen lag. Hierbei wurde im AP1 exemplarisch die Simulation der Auslegung großskaliger Elektrolyseuranlagen umgesetzt. In enger Verzahnung mit den Arbeitspaketen 8 und 9 (AP8 & AP9) wurde die Anlagensimulation um eine automatisierte Rohrleitungsplanung sowie die Ableitung weiterer Planungsdokumente erweitert (für tiefere Erläuterung siehe dort). Im Kontext der Simulation von Produktionsprozessen wurde in ebenjenem Arbeitspaket der Aufbau von Simulationsumgebungen für Montageprozesse am Beispiel der Kabinettmontage von Elektrolyseuren im Rackformat (< 12,5 kW) exemplarisch umgesetzt. Da die Simulation produktionsbezogener Abläufe (z. B. Kabinettmontage) in den Arbeitspaketen 3 und 5 weiter vertieft wird, liegt der Fokus der Ergebnisbeschreibung dieses Arbeitspakets primär auf der Simulation der Planungsprozesse, insbesondere auf der Auslegung und Strukturierung großskaliger Elektrolyseuranlagen (> 100 MW).

Detailbeschreibung:

Das Arbeitspaket 1 (AP1) zielte darauf ab, die Planungs- und Produktionsprozesse von Elektrolyseurgroßanlagen digital abzubilden, zu bewerten und zu optimieren. Der Schwerpunkt lag dabei auf der Modularisierung der Systemarchitektur sowie auf der Umsetzung relevanter Teilsimulationen. Die Motivation zur Modularisierung besteht darin, eine flexible und kundenspezifische Produktkonfiguration verschiedener Elektrolyseurkonzepte zu ermöglichen. Grundlage bildet ein standardisiertes, modulares Datenmodell, in dem alle relevanten Module (z. B. Elektrolyseur, Wasseraufbereitung, Gastrocknung, Kühlung) als Einzelelemente beschrieben und in einem zentralen „Teilekatalog“ hinterlegt sind. Die technische Auslegung und Datenmodellierung dieser Module erfolgten in den Arbeitspaketen 6 (AP6, technische Spezifikation) und 2 (AP2, Datenmodellierung).

Die so entstandene Baukastenarchitektur ermöglicht die Zusammenstellung von Anlagenkonfigurationen entsprechend den kundenspezifischen Leistungsanforderungen, den Platzverhältnissen und den Medienverfügbarkeiten. Zusätzlich wurden die Ergebnisse der Wasserstudie der Entwicklungsagentur Region Heide berücksichtigt, welche die unterschiedlichen Wirkungsgrade je nach Herkunft des Speisewassers untersucht hat und einen erheblichen Einfluss auf die Anforderungen an die Wasserverfügbarkeit hat. Über ein grafisches Benutzerinterface (GUI) können diese Parameter aufgenommen und automatisiert in die Layout- und Strukturplanung überführt werden. Für die Kalkulation und Visualisierung der Anlagenspezifikation wurde der Entwicklungsworkflow in Microsoft Visual Studio in Kombination mit der Game-Engine Unity gewählt. Die in der Antragsstellung formulierten Kommunikationen zu verschiedenen Co-Simulationsmodulen sind in der Detailbeschreibung des dritten Arbeitspakets (AP3) zu finden.

Ziel der Planungsprozesssimulation war es, auf Basis der modularen Datenstruktur eine automatisierte Auslegung und räumliche Anordnung großskaliger Elektrolyseuranlagen zu realisieren. Basierend auf den Informationen der resultierenden Aufbaustruktur wurden im Zusammenhang mit einer automatisierten Dokumentation und Qualitätssicherung verschiedene Ansätze zur Ableitung anlagenspezifischer Dokumente (Stücklisten, Rechnungen, etc.) untersucht und exemplarisch umgesetzt (Erläuterung siehe AP8). Darüber hinaus wurde eine Automatisierung der Rohrleitungsplanung mithilfe von Reinforcement Learning (RL) untersucht, um die aktuell zeit- und kostenintensiven Planungsprozesse zu standardisieren und automatisieren. Aufgrund des Standardisierungsansatzes ist die Detailbeschreibung unter der Ergebnisdarstellung des Arbeitspakets 9 (AP9) zu finden.

Die Layoutsimulation basiert auf den im Datenmodell beschriebenen Modulen sowie den baustellenspezifischen Randbedingungen, wie verfügbare Baufläche, Netzanschlussleistung, Wasserverfügbarkeit sowie die Wasserquelle. Über das Benutzerinterface werden diese Parameter aufgenommen und bei der Auslegung der Großanlage berücksichtigt.

Ein Algorithmus übersetzt diese Eingaben in eine erste modulare Anlagenkonfiguration, wobei:

- die erforderliche Anzahl und Kombination der Module automatisch bestimmt,
- geometrische Abstände und Sicherheitszonen berücksichtigt,
- grafische 3D-Repräsentationen in Form von CAD-Modellen geladen und platziert.

Das Ergebnis ist ein parametrisch generiertes Anlagenlayout, das als Ausgangspunkt für alle weiterführenden Planungs- und Simulationsprozesse dient (siehe Abbildung 1).



Abbildung 1: Darstellung verschiedener Modularisierungsgrade bei der Skalierung von Elektrolyseurößenanlagen

Für die Erzeugung der Anlagenstruktur wurden zwei Ansätze verfolgt: Zum einen das im Projektkonsortium entwickelte 100-MW-Clusterkonzept, das innerhalb eines Clusters eine eigenständige, funktionsfähige Elektrolyseeinheit abbildet, und zum anderen eine vollständig kundenindividuelle Anlagenkonfiguration. Das 100-MW-Clusterkonzept bietet den Vorteil eines reduzierten Planungsaufwands und einer hohen Standardisierung. Allerdings führt die feste Clustergröße bei Netzanschlussleistungen, die nicht in 100-MW-Schritten skalieren, zu Redundanzen in den Systemkomponenten, was insbesondere bei sehr großen Elektrolyseuranlagen zu erhöhten Kosten und eingeschränkter Wirtschaftlichkeit führen kann. Durch die im Projekt entwickelten automatisierten Planungs- und Auslegungsprozesse ist eine flexible und bedarfsgerechte Gestaltung der Anlagenarchitektur möglich. Daher wurde ergänzend auch die kundenindividuelle Modularisierung untersucht, die eine an den Standort und die Betriebsanforderungen angepasste, ressourceneffizientere Anordnung der Systemmodule ermöglicht und somit zu einer verbesserten Gesamtperformance der Anlage beitragen kann.

Ergebnisübersicht:

Im AP1 wurden zentrale Grundlagen zur digitalen Abbildung, Bewertung und Optimierung der Planungs- und Produktionsprozesse großskaliger Elektrolyseurößenanlagen geschaffen. Der Schwerpunkt lag auf der Entwicklung einer modularen Systemarchitektur sowie auf der Umsetzung erster Teilsimulationen, die eine automatisierte und datenbasierte Anlagenplanung ermöglichen. Durch die Kombination aus modularer Datenbasis, automatisierter Layoutplanung und intelligenter Leitungsoptimierung wurde ein digitaler, iterativer Planungsprozess umgesetzt, der sowohl modulare Clusteransätze (z. B. 100-MW-Module) als auch flexible, kundenindividuelle

Anlagenkonfigurationen unterstützt. AP1 liefert damit die methodische Grundlage für die nachfolgenden Arbeitspakete, in denen Datenmodellierung, Produktionssimulation und Dokumentenerstellung weiter vertieft werden.

AP2: Ermittlung der Grundsatzparameter für Endmontagesysteme

Kurzzusammenfassung:

Die elementaren Ziele des Arbeitspakets 2 (AP2) des vorliegenden Teilprojektes stellten die Definition eines standardisierten Datenmodells und die gezielte Integration desselben in den Wertschöpfungsprozess der Elektrolyseurproduktion dar. Das standardisierte Datenmodell wurde mithilfe des strukturellen Beschreibungsformates AutomationML (AML) realisiert, welches im Kern auf die Substandards bzw. Formate CAEX, Collada und OpenPLC zurückgreift und im übergeordneten Sinne den Informationsaustausch in Engineering-Prozessen erleichtern soll. Für die Integration in die vorab genannte Wertschöpfungskette und eine entsprechende Datendurchgängigkeit werden die Anforderungen aus exemplarischen Domänen, wie Simulation, Controlling etc. berücksichtigt. Weiter wurden exemplarische Schnittstellen zu entsprechenden Systemen vorgesehen, welche in den Arbeitspaketen 1, 2, 3, 6, 8 und 9 ausdetailliert wurden.

Detailbeschreibung:

Zentrale Voraussetzung für eine effiziente Simulation komplexer Elektrolyseuranlagen sowie der zugehörigen Produktion ist eine einheitliche Datenbasis. Daher wurde eine standardisierte Datenstruktur entwickelt, die alle produkt- und anlagenrelevanten Parameter in einem konsistenten Format abbildet. Dieser Aspekt wurde sowohl für die Elektrolyseuranlage selbst als auch für eine automatisierte Produktionsanlage umgesetzt, um verschiedene Phasen des Wertschöpfungsprozesses bzw. Entwicklungsprozesses zu adressieren. Zur Begründung der Wahl einer standardisierten Datenbasis wird auf das Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI 4.0) verwiesen, das als Orientierungsrahmen für die strukturierte Digitalisierung industrieller Systeme dient. RAMI 4.0 beschreibt die systematische Abbildung von Assets über deren gesamten Lebenszyklus hinweg, von der Entwicklung über die Produktion bis hin zum Betrieb, und stellt damit eine einheitliche Referenz für den Informationsaustausch zwischen unterschiedlichen Systemen und Akteuren bereit. Aufbauend auf diesem Modell wird die Verwendung von AML als standardisiertes Datenformat empfohlen, da es eine durchgängige, herstellerübergreifende Beschreibung technischer Anlageninformationen über den gesamten Asset-Entwicklungslebenszyklus hinweg ermöglicht. Damit eignet es sich insbesondere für die Planung, Integration und produktive Nutzung von Assets in digital vernetzten Produktionsumgebungen. Darüber hinaus unterstützt AML den Datenaustausch über verschiedene Softwaretools und Kommunikationsnetzwerke hinweg und bildet damit die technische Grundlage für die in diesem Arbeitspaket angestrebte interoperable, konsistente und erweiterbare Datenhaltung.

Aufgrund der Übersichtlichkeit und Nachvollziehbarkeit wurde das Datenmodell in zwei aufeinander referenzierende Modelle aufgeteilt. Der Fokus des ersten Modells liegt auf der Datenhaltung anlagenspezifischer Parameter für die großskalige Elektrolyseanlage, wohingegen das zweite Modell auf die produktionsfokussierte Datenhaltung fokussiert ist. Hierdurch entsteht eine klassenorientierte, standardisierte Vereinheitlichung der Problembeschreibung der Gesamtanlage sowie der produktionspezifischen Darstellung der Engineeringdaten. Der Aufbau

und die Struktur der Datenbasis wurden sowohl mit Mitgliedern des Vereins AutmationML e. V. sowie projektübergreifend mit Teilnehmern des Projektes FertiRob diskutiert, evaluiert und in Form von Veröffentlichungen mit der wissenschaftlichen Community geteilt.

Datenmodell Elektrolyseuranlage:

Das erarbeitete Datenmodell zur Datenhaltung großskaliger Elektrolyseanlagen umfasst sowohl die technischen Kenngrößen der einzelnen Module eines großskaligen Elektrolyseurs als auch Metadaten zu Schnittstellen, Medienflüssen sowie zu Referenzen zu den 3D-Repräsentationen. Das folgende Klassendiagramm dient der modellhaften Darstellung am Beispiel eines Elektrolyseurskids (AEM) mit Schnittstellen zur Dokumentation und zur physischen Infrastruktur. Die Visualisierung erfolgt gemäß den Konventionen der Unified Modeling Language (UML) zur Unterstützung der systematischen Entwicklung technischer Komponenten.

Die Klasse Elektrolyseurskid steht in zwei gerichteten Assoziationen zu den Interfaces DocumentInterface und PhysicalInterface und wurde mit umfangreichen technischen Attributen spezifiziert. Sie beinhaltet sowohl geometrische als auch funktionale Eigenschaften mit umfangreichen technischen Attributen. Die Klasse DocumentInterface repräsentiert Metadaten zur zugehörigen Dokumentation. Diese Schnittstelle stellt die Verlinkung zu externen Informationsquellen sicher, wohingegen das PhysicalInterface mechanische und materialbezogene Verbindungen zu angrenzenden Systemkomponenten beschreiben. Jedes Modul wurde in einer entsprechenden Bibliothek durch die in Abbildung 2 dargestellte Form spezifiziert.



Abbildung 2: Beispielhaftes UML-Diagramm des AEM Elektrolyseskid-Moduls

Diese standardisierte Modulbeschreibung ermöglicht sowohl die automatisierte Anlagenkonfiguration als auch den Austausch zwischen Simulations- und Planungstools. Die technische Auslegung der Module erfolgte in enger Abstimmung mit den Ergebnissen des Arbeitspakets 6 (Modulspezifikation) und wurde über die gesamte Projektlaufzeit hinweg aktualisiert.

Datenmodell Produktionsanlage:

Die Beschreibung des produktionspezifischen Datenmodells erfolgte auf Basis des Produkt-Prozess-Ressourcen-Modells, das jedes Systemelement (z. B. Elektrolyseur, Wasseraufbereitung, Powersupply, etc.) als eigenständiges Modul mit definierten Schnittstellen sowie die benötigten Produktionsressourcen (Roboter, Förderbänder, etc.) und die dazugehörigen Produktionsprozesse (Roboterprogrammtemplates) beschreibt. Mithilfe von Links (vergleichbar mit gerichteten Kanten einer Graphenstruktur) wurden die Zusammenhänge zwischen Produkt, Prozess und Ressource modelliert. Identisch mit dem vorherigen Modell wurden auch hier die verschiedenen Instanzen in Bibliotheken ausspezifiziert und mit Referenzen zu den 3D-Repräsentationen versehen, die anschließend im Aufbau diverser Simulationen verwendet wurden (siehe Abbildung 3).

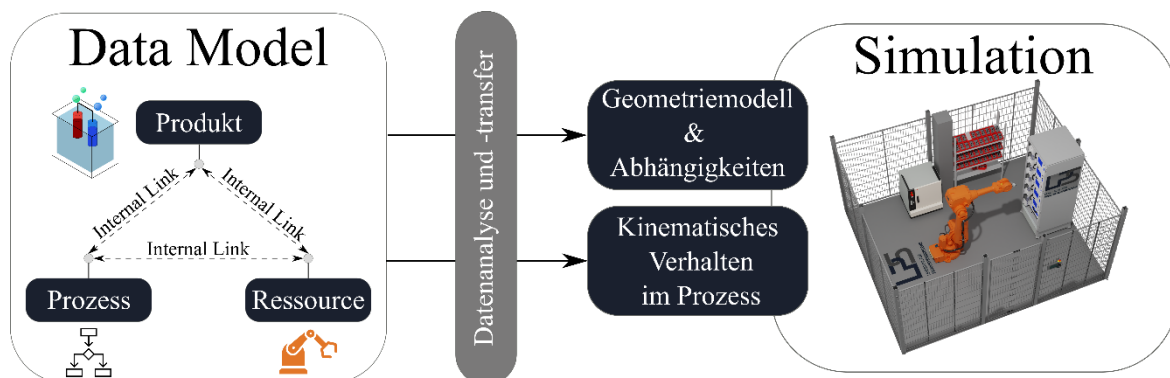


Abbildung 3: Schematischer Zusammenhang zwischen Datenmodell und Simulationsmodell

Ergebnisübersicht:

Im Arbeitspaket 2 wurde eine einheitliche, durchgängige Datenbasis geschaffen, die als zentrale Voraussetzung für die Simulation, Planung und Bewertung großskaliger Elektrolyseur- und Produktionssysteme dient. Hierzu wurde ein standardisiertes Datenmodell auf Basis von AutomationML (AML) entwickelt und in die Wertschöpfungskette der Elektrolyseurproduktion integriert. Das Modell gewährleistet einen konsistenten Informationsaustausch über den gesamten Asset-Lebenszyklus hinweg und orientiert sich dabei am Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI 4.0).

Die Datenstruktur wurde in zwei komplementäre Modelle aufgeteilt:

- Anlagenmodell, das alle relevanten technischen, geometrischen und funktionalen Parameter der Elektrolyseurmodule abbildet, einschließlich der Medienflüsse, Schnittstellen und Referenzen zu 3D-Repräsentationen.

- Produktionsmodell, das produktionsrelevante Informationen im Sinne des Produkt-Prozess-Ressourcen-Modells beschreibt und damit die Zusammenhänge zwischen Produktstrukturen, Montageprozessen und den benötigten Ressourcen formalisiert.

Durch diese Modularisierung entsteht eine konsistente, interoperable Datenhaltung, die sowohl automatisierte Anlagenkonfigurationen als auch unterschiedliche Simulations- und Planungstools unterstützt.

AP3: Erforschung der anwendbaren Steuerungstechnologien durch Simulationssysteme

Kurzzusammenfassung:

Zentrales Ziel des Arbeitspakets 3 war die Entwicklung von Methoden und Vorgehensstrategien zur vereinfachten Ableitung von Steuerungs- bzw. Roboterprogrammcode. Dieser Code soll zur direkten Bewegungssteuerung von Komponenten automatisierter Produktionsanlagen eingesetzt werden. Die weitgehend automatisierte und möglichst einfache Generierung von Programmcode ist von großer Bedeutung, da der Programmierprozess nach aktuellem Stand der Technik tiefgehende Programmierkenntnisse sowie detailliertes Wissen über die zu steuernde Hardware (z. B. Industrieroboter, Fördersysteme, Sensoren) erfordert. In der derzeit noch stark manuell geprägten Elektrolyseurproduktion ist ein solcher Erfahrungsschatz jedoch nur in begrenztem Umfang vorhanden. Zudem können qualifizierte Fachkräfte aufgrund des allgemeinen Fachkräftemangels nicht ohne Weiteres aus anderen Branchen gewonnen werden. Um diesen Herausforderungen effizient zu begegnen und gleichzeitig jungen Industriezweigen wie der Elektrolyseurproduktion den erfolgreichen Zugang zu modernen Automatisierungstechnologien zu ermöglichen, werden im Rahmen des Arbeitspakets Methoden erforscht, die es künftig auch Nicht-Experten ermöglichen, eigenständig Programmcode für Automatisierungssysteme zu erstellen. Die geschaffenen Lösungen fokussieren den datengestützten Aufbau von Simulationsumgebungen mittels AutomationML und die teilautomatisierte Ableitung von Roboterprogrammcode durch die Integration von Engineering-Daten, Roboterbahnplanung und großen Sprachmodellen (LLM) in einer übergeordneten Systemstruktur.

Detailbeschreibung:

Bevor die teilautomatisierte Ableitung von Programmcode fokussiert werden konnte, wurde zunächst der vorgelagerte Aufbau einer Simulationsumgebung betrachtet. Im Rahmen dessen war es das Ziel, Umweltmodelle für Robotersimulation auf Basis von standardisierten Datenmodellen im AML-Format aufzubauen (vgl. AP2). Hierfür wurde vergleichbar mit den Arbeiten aus AP1 ein Datenmodell aufgebaut, welches im Kern zum einen auf die CAD-Daten des spezifischen Umweltmodells referenziert und weiterführend mittels sogenannter Frame-Attribute die räumliche Anordnung der Komponenten spezifiziert. Darüber hinaus wurden bereits für die Verhaltenssimulation relevante Aspekte, wie etwa die Interaktionsmöglichkeit zwischen Objekten, hinterlegt. Dies wurde durch Anwendung des Produkt-Prozess-Ressource-Modells und sogenannter internal Links realisiert. Letztere modellieren durch die Verknüpfung von Einzelkomponenten die Interaktion zwischen Simulationselementen. Der Aufbau der tatsächlichen Simulationsumgebung erfolgt schlussendlich durch den Einsatz eines spezifischen Parsers, welcher die Datenstruktur analysiert und einer anschließenden Weiterleitung der Informationen sowie Geometriemodelle in eine Simulationssoftware. In dieser erfolgt dann die finale Instanziierung. Konkret erfolgte eine Umsetzung mit den Simulationssystemen ABB

RobotStudio, welche auf die Simulation von Robotern spezialisiert ist, und Unity, welche ebenso die tiefere Simulation von physikalischen Zusammenhängen ermöglicht.

Aufbauend auf den zuvor beschriebenen Entwicklungen und Forschungsansätzen wurde eine ganzheitliche Lösung zur Generierung von Roboterprogrammcode auf Basis natürlicher Sprache entwickelt. Hierbei kommt eine geeignete Kombination aus einer Daten- bzw. Wissensbasis in Form eines AML-Datenmodells und eines LLMs zum Einsatz. Die entwickelte Lösung folgt dem in Abbildung 4 dargestellten Prozess. Eine natürlichsprachliche Nutzereingabe wird zunächst vom LLM analysiert und anschließend in mehreren Subprozessen schrittweise in lauffähigen Robotercode überführt. Im Anschluss erfolgt eine simulationsbasierte Prüfung. Dabei kann der Anwender die generierte Lösung in Form von Bewegungsabläufen innerhalb einer spezifischen Arbeitsumgebung, dem Umweltmodell der Simulation, nachvollziehen. Ergänzend wurde eine automatisierte Validierung in die Simulation integriert, welche grundlegende Qualitätskriterien – wie Kollisionsfreiheit, zulässige Geschwindigkeiten, Vermeidung von Singularitäten sowie die Einhaltung der gewünschten Prozessfolge – sowohl überprüft als auch dokumentiert. Dies ist von besonderer Wichtigkeit, da nur durch eine entsprechende Validierung und Absicherung der künstlich geschaffenen Lösung eine Übertragung auf ein Realsystem erfolgen kann. Nur so können potenzielle Gefahren z. B. in Form von Kollisionen, welche zu signifikanten Unfällen führen können, ausgeschlossen werden. Die einzelnen Subkomponenten des ganzheitlichen Ansatzes, wie er in Abbildung 4 dargestellt ist, werden in den nachfolgenden Textabschnitten im Detail erläutert.

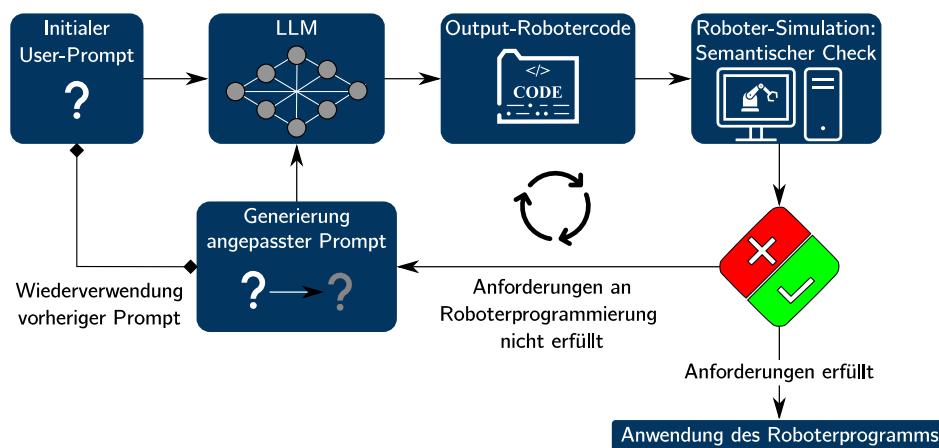


Abbildung 4: Workflow der KI-gestützten Roboterprogrammierung

Für die Generierung von lauffähigem Programmcode bzw. einer geeigneten Roboterbewegung werden die natürlichsprachlichen Nutzereingaben zunächst analysiert und mit der Wissens- und Datenbasis (AML) abgeglichen. Konkret erfolgt dabei im ersten Schritt die Extraktion aller für den betrachteten Prozess relevanten Informationen aus der Nutzereingabe. Zu diesen Informationen zählen beispielsweise die zu verwendenden Bauteile, die Form der gewünschten Interaktion sowie die jeweiligen Soll-Zustände. Ebenso werden die beschriebenen Prozessschritte und deren Abfolge aus der natürlichsprachlichen Eingabe erkannt und strukturiert abgeleitet. Im Anschluss werden alle für die Programmierung notwendigen Detailinformationen aus der AML-Datenbasis extrahiert. Dabei handelt es sich insbesondere um die räumlichen Positionen und Posen, die im Rahmen der resultierenden Roboterbewegung anzufahren sind. Auf Grundlage der ermittelten Prozessfolgen und Zielpositionen erfolgt im nächsten Schritt die Bahnplanung mittels eines

kollisionsfreien Bahnplaners. Konkret kommt hierfür das Framework MoveIt im Rahmen von ROS2 zur Anwendung. Die Bahnplanung basiert im Kern auf der Rückwärtstransformation kartesischer Positionen und Orientierungen in Achswinkelkonfigurationen des Roboters. Der Prozess wird iterativ über mehrere Zyklen hinweg durchgeführt, bis eine initiale geeignete Lösung für das durch den Nutzer beschriebene Programm gefunden wird. Das detaillierte Zusammenspiel der einzelnen Systemkomponenten – Präsentationsebene, Verarbeitungsebene, Datenbasis und Ausführungsebene – ist in Abbildung 5 dargestellt.

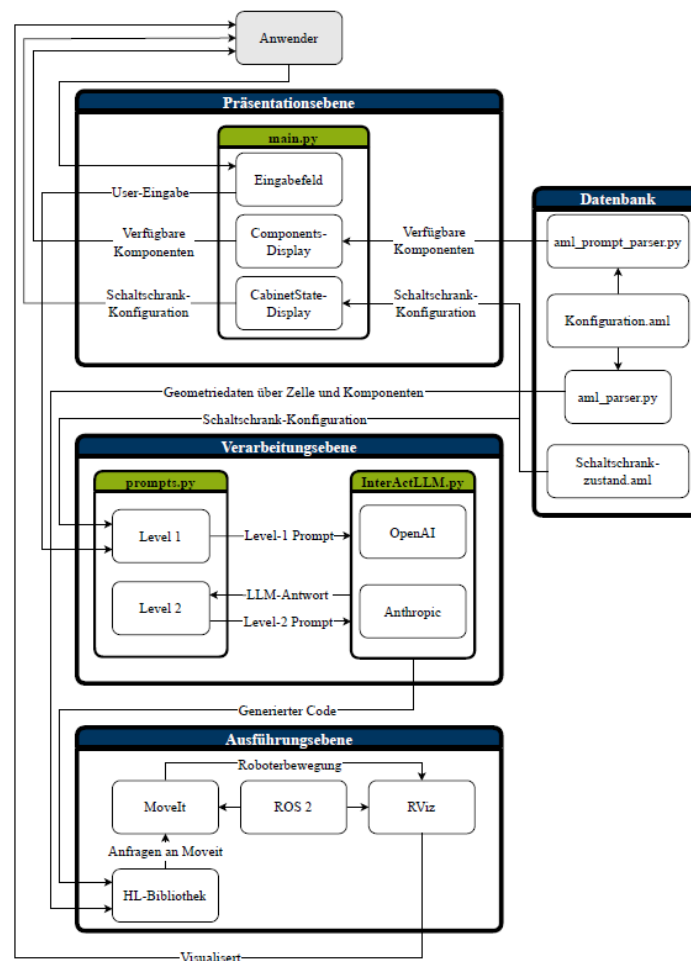


Abbildung 5: Systembeschreibung und Ablaufplan zur automatisierten Roboterprogrammerzeugung

Für eine möglichst intuitive Interaktion mit dem zuvor beschriebenen System wurde eine entsprechende Mensch-Maschine-Schnittstelle (GUI) implementiert, wie sie in Abbildung 6 dargestellt ist. Über ein Eingabefenster können Anwender natürlichsprachliche Befehle (Prompts) direkt als textuellen Input eingeben. Die daraus generierten Lösungen werden in Form von Programmcode unmittelbar in der Anwendung visualisiert. Gleiches gilt für die Komponenten, die Teil des gewünschten Prozesses sind – beispielsweise beteiligte Bauteile, Werkzeuge oder Roboterkinematiken, die in einem Montageprozess eingesetzt werden. Darüber hinaus ermöglicht die Benutzeroberfläche die Auswahl verschiedener LLMs zur Programmgenerierung. Dabei können sowohl proprietäre als auch Open-Source-Modelle genutzt werden. Aus wissenschaftlicher Sicht sind insbesondere Open-Source-Modelle von Interesse, während in

industriellen oder kommerziellen Anwendungen auch proprietäre Modelle gesonderte Vorteile bieten können. Abschließend kann aus der beschriebenen Oberfläche heraus ein Transfer in eine geeignete Simulationsumgebung initiiert werden, in der die zuvor generierte Lösung getestet und validiert werden kann.

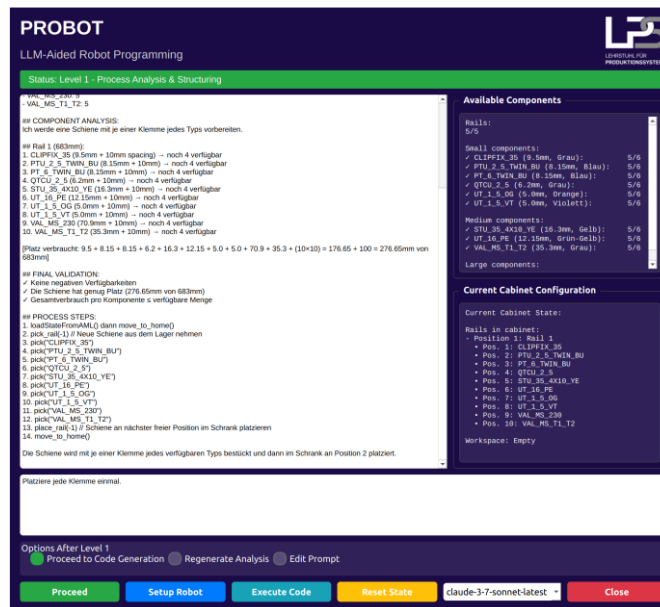


Abbildung 6: Visualisierung des Benutzerinterfaces

Im Rahmen der Forschungsarbeit wurde zur Evaluierung der entwickelten Lösung der Prozess der Klemmleistenmontage für Schaltschränke fokussiert. Dieser Prozess dient als relevantes Anwendungsbeispiel, da für den Aufbau einer großskaligen Elektrolyseuranlage (siehe AP1) eine Vielzahl von Schaltschränken erforderlich ist, um den Betrieb der Gesamtanlage zu gewährleisten. Darüber hinaus ist der Prozess auch aufgrund der hohen Varianz an verbauten Elementen, wie Klemmen, von besonderem Interesse. Diese Vielfalt ermöglicht eine umfassende Erprobung der entwickelten Systematik unter wechselnden Konfigurationen, die sich aus unterschiedlichen Kombinationen von Klemmen ergeben. Das im Projektrahmen untersuchte Anwendungsszenario ist in Abbildung 7 dargestellt.

Im Sinne des in Abbildung 4 dargestellten Workflows erfolgt nach der erfolgreichen Programmgenerierung eine gesonderte simulationsbasierte Prüfung der generativ erzeugten Lösung. Hierfür wurde ein separates Softwaremodul auf Basis verschiedener Simulationsansätze entwickelt. Ziel dieses Moduls ist es, auftretende Fehler nicht nur zu erkennen, sondern auch möglichst präzise zu identifizieren, welche Elemente am Fehler beteiligt sind und welche Komponenten bzw. Codezeilen der generierten Lösung die Problematik verursachen. Dadurch können Anwender gezielt informiert werden und eigenständig ein effizientes Troubleshooting durchführen. Alternativ ist vorgesehen, die identifizierten Fehlerinformationen künftig direkt in die Planungssystematik zurückzuführen, um auf diese Weise einen automatisierten Optimierungsprozess durch das System selbst anzustoßen. Hierfür werden die notwendigen Informationen bereits in ein strukturiertes textuelles Format überführt, konkret in eine JSON-Struktur (siehe Abbildung 9).

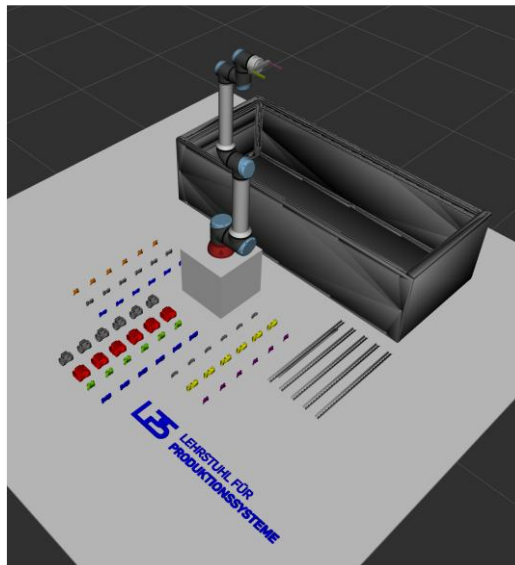


Abbildung 7: Darstellung des untersuchten Anwendungsszenarios – Bestückung von Schaltschränken

Abbildung 8 zeigt einen Ausschnitt aus der simulativen Prüfung und zeigt die Kollision eines Roboters mit einer anderen Strukturkomponente. Ein resultierender Kontakt könnte in einer signifikanten Beschädigung sowohl des Roboters als auch der Strukturkomponente resultieren.

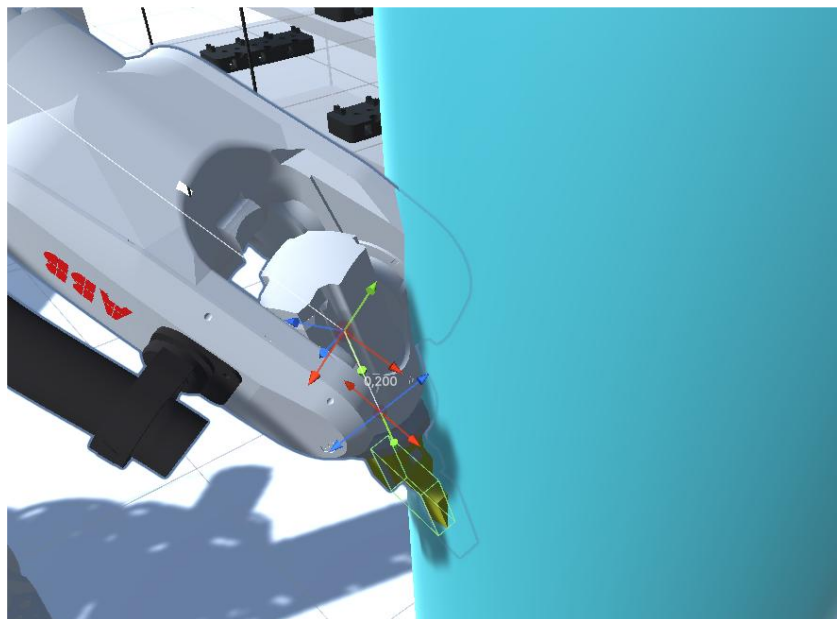


Abbildung 8: Simulationsgestützte Kollisionsüberprüfung des generierten Roboterprogramms

Innerhalb der physikalischen Simulation wird ebenjener Kontakt erkannt und es erfolgt eine umfangreiche Analyse sowie Dokumentation des spezifischen Fehlers. Abbildung 9 zeigt die entsprechende Dokumentation. So wird exakt erfasst und dokumentiert, welche Elemente des Roboters (Achsen oder Werkzeug) mit der Umgebung kollidieren. Weiter werden die aktuelle Achskonfiguration und der räumliche Kollisionspunkt ausgegeben sowie die Codezeile im zugehörigen Quellcode, welcher zum Zeitpunkt des Auftretens von der Robotersteuerung verarbeitet wird. Langfristig bietet die beschriebene Systematik die Möglichkeit, nicht nur den

Programmierprozess selbst für End-User zugänglicher zu gestalten, sondern auch die nachgelagerte Analyse und Bewertung der geschaffenen Lösung in größeren Teilen vom spezifischen Anwenderwissen zu entkoppeln. Als Konsequenz könnten daraus Anwendergruppen, wie kleine und mittelständische Unternehmen oder junge Industriezweige einen vereinfachten Zugang zur industriellen Robotik erhalten sowie als Konsequenz dessen von den resultierenden Vorteilen profitieren.

```
[
  {
    "monitorName": "Collision Detector",
    "eventType": 2,
    "description": "CRITICAL COLLISION: Gripper -> Sauele",
    "robotStateSnapshot": "[...]",
    "eventDataJson": "{\n\"robotLink\": \"Gripper\", \"collisionObject\": \"Sauele\", \"col
    → lisionPoint\": {\n\"x\": -1.146544337272644, \"y\": 0.038220398128032687, \"z\": 1.14
    → 65449333190919}, \"distance\": 1.6219075918197632}"
  },
  {
    "monitorName": "Collision Detector",
    "eventType": 2,
    "description": "CRITICAL COLLISION: Joint_4 -> Sauele",
    "robotStateSnapshot": "[...]",
    "eventDataJson": "{\n\"robotLink\": \"Joint_4\", \"collisionObject\": \"Sauele\", \"col
    → lisionPoint\": {\n\"x\": -1.146544337272644, \"y\": 0.038220398128032687, \"z\": 1.14
    → 65449333190919}, \"distance\": 1.6219075918197632}"
  },
  {
    "monitorName": "Collision Detector",
    "eventType": 2,
    "description": "CRITICAL COLLISION: Joint_6 -> Sauele",
    "robotStateSnapshot": "[...]",
    "eventDataJson": "{\n\"robotLink\": \"Joint_6\", \"collisionObject\": \"Sauele\", \"col
    → lisionPoint\": {\n\"x\": -1.146544337272644, \"y\": 0.038220398128032687, \"z\": 1.14
    → 65449333190919}, \"distance\": 1.6219075918197632}"
  },
  {
    "monitorName": "Collision Detector",
    "eventType": 2,
    "description": "CRITICAL COLLISION: Joint_5 -> Sauele",
    "robotStateSnapshot": "[...]",
    "eventDataJson": "{\n\"robotLink\": \"Joint_5\", \"collisionObject\": \"Sauele\", \"col
    → lisionPoint\": {\n\"x\": -1.146544337272644, \"y\": 0.038220398128032687, \"z\": 1.14
    → 65449333190919}, \"distance\": 1.6219075918197632}"
  },
  {
    "monitorName": "Collision Detector",
    "description": "Collision detected between Gripper and CylinderHead (8)",
    "eventType": 1,
    "robotStateSnapshot": "[...]",
    "eventDataJson": "{\n\"robotLink\": \"Gripper\", \"collisionObject\": \"CylinderHead
    → (8)\", \"collisionPoint\": {\n\"x\": -1.9333001375198365, \"y\": 0.5249927043914795,
    → \"z\": -1.1674463748931885}, \"distance\": 2.3186628818511965}"
  }
]
```

Abbildung 9: Darstellung verschiedener Modularisierungsgrade bei der Skalierung von Elektrolyseurgrößenanlagen

Ergebnisübersicht:

Insgesamt konnte im Rahmen des Arbeitspakets 3 eine ganzheitliche Lösung zur automatischen Generierung von Roboterprogrammcode realisiert werden. Wie im Antrag beschrieben, wurden hierfür AML-Datenbeschreibungen verwendet. Diese wurden um den Einsatz eines LLMs erweitert, um eine möglichst vollständig automatisierte Roboterprogrammierung zu ermöglichen. Die entwickelte Lösung ermöglicht Anwendern, einen Roboter ausschließlich mithilfe natürlicher Sprache zu programmieren – ohne direkte Eingabe von Programmcode. Realisiert wurde diese Lösung mithilfe einer vom BMFTR geförderten KI-Rechenarchitektur, die eine leistungsfähige Hardware bereitstellt und damit beispielsweise das lokale Ausführen eines LLMs ermöglicht.

AP5: Mensch-Maschine-Interaktion/Mensch-Roboter-Kollaboration (MRK)

Kurzzusammenfassung:

Das Arbeitspaket 5 des LPS-Teilprojekts im Gesamtvorhaben HyPLANT100 adressierte die Flexibilisierung von Automatisierungs- und Roboterprogrammierungsprozessen in hybriden

Montagesystemen mit besonderem Fokus auf Mensch-Roboter-Kollaboration (MRK). Ziel war die systematische Untersuchung, Auslegung und Bewertung kollaborativer Montageszenarien für die Produktion von Elektrolyseuranlagen unter Berücksichtigung sicherheitstechnischer, prozessualer und simulationsbasierter Aspekte.

Im Zentrum der Arbeiten stand die Analyse geeigneter MRK-Konfigurationen für ausgewählte Montageaufgaben, ergänzt durch den Vergleich mit rein manuellen sowie vollautomatisierten Szenarien. Darüber hinaus wurden Methoden zur Prozessbewertung, Datenstrukturen für beispielsweise Vormontageprozesse sowie simulationsgestützte Planungsansätze entwickelt. Die erzielten Ergebnisse tragen wesentlich zur Bewertung der Eignung und Realisierbarkeit hybrider Montage sowie der Flexibilisierungspotenziale in der Elektrolyseurmontage bei und bilden eine methodische Grundlage für zukünftige Produktionskonzepte.

Detailbeschreibung:

Der LPS verfolgt das Ziel, neue Technologien für robotergestützte Produktionssysteme, innovative Automatisierungslösungen sowie neuartige Handhabungssysteme zu entwickeln. Innerhalb des Projekts HyPLANT100 leistete das LPS-Teilprojekt einen zentralen Beitrag in den Bereichen der robotergestützten Automatisierung, der simulationsgestützten Planung sowie der Mensch-Roboter-Kollaboration (MRK). AP5 fokussierte sich dabei auf die konkrete Ausgestaltung, Bewertung und Demonstration kollaborativer und vollautomatisierter Montageszenarien in hybriden Produktionssystemen für die Elektrolyseurmontage.

Obwohl auch manuelle und vollständig automatisierte Montageansätze betrachtet wurden, lag der initiale wissenschaftliche Schwerpunkt auf MRK-Szenarien, da diese im Vergleich deutlich höhere Anforderungen an Prozessgestaltung, Sicherheit und Flexibilität stellen. Ziel war es, spezifische Anforderungen kollaborativer Montagesysteme systematisch zu analysieren und deren Eignung für ausgewählte Montageprozesse in der Elektrolyseurproduktion zu bewerten.

Vorbereitend konnten zu Beginn des AP5 umfangreiche Vorarbeiten zur hybriden und automatisierten Vormontage erzeugt werden. Hierzu zählte insbesondere der Aufbau geeigneter Datenstrukturen zur Beschreibung von Vormontageprozessen sowie der kontinuierliche Austausch mit dem Konsortium zur Identifikation relevanter Prozessschritte. Parallel dazu wurden Arbeiten zur Prozessdefinition in der Elektrolyseurmontage durchgeführt, mit einem inhaltlichen Schwerpunkt auf der Anlagenperipherie. Zur systematischen Analyse dieser Prozesse wurde ein standardisiertes Template zur Prozessaufnahme und -bewertung entwickelt.

Ein weiterer Fokus lag auf der Bewertung von Prozessen hinsichtlich einer automatisierungs- und MRK-gerechten Gestaltung der Konstruktion, sowie ihrer grundsätzlichen Eignung für hybride Anwendungen. Dabei wurden sowohl technische als auch organisatorische Aspekte berücksichtigt, vergleiche Abbildung 10. Die industriellen Projektpartner wurden durch gezielte Demonstrationen und Workshops in das Thema der hybriden Montage eingeführt, unter anderem anhand von Messeexponaten und praktischen Beispielen in der Lern- und Forschungsfabrik des LPS. Insbesondere das Thema Standardisierung, als notwendige Voraussetzung einer Automatisierung hat zu Einsparungen und Prozessverbesserungen der Partner beigetragen.

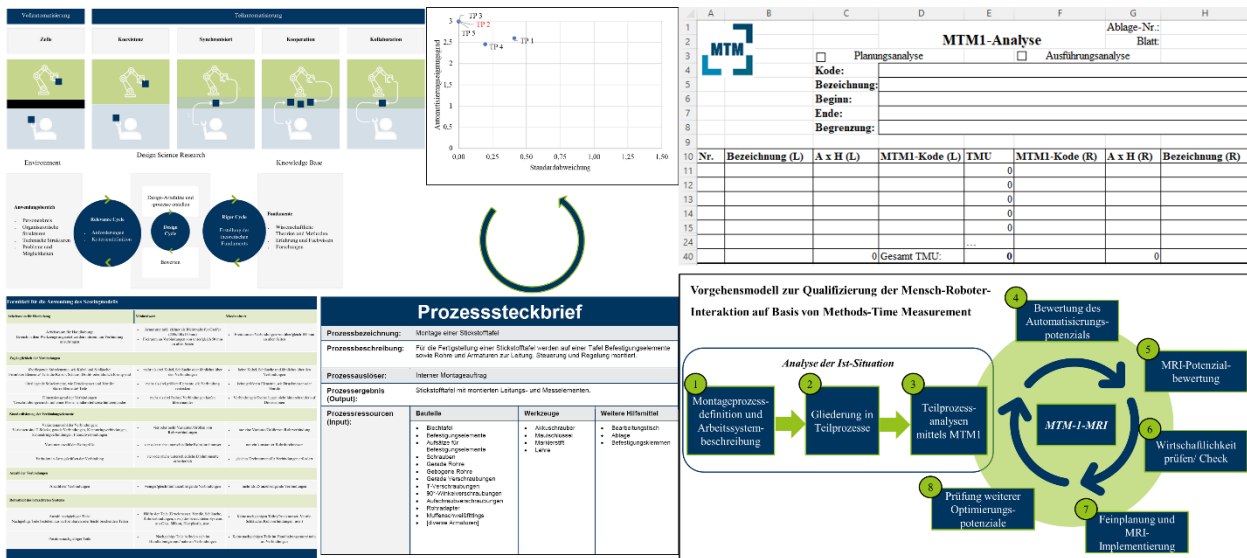


Abbildung 10: Entwicklung unterschiedlicher Methodiken zur Prozessauswahl von MRK-Prozessen

Auf Basis der gemeinsam mit den Anwendungspartnern Fest und H2CS identifizierten Montageprozesse erfolgten Abstimmungen mit dem Automatisierungspartner IBG, insbesondere hinsichtlich der bis heute aufwändig zu automatisierenden Verbindungstechnik von Schläuchen, Kabeln und Rohrleitungen. Diese Schnittstellentechnik erwies sich als besonders geeignet für Standardisierungs- und Automatisierungsansätze. In diesem Kontext wurden Doppelklemmringverbindungen als relevanter Industriestandard für wasserstoffführende Rohrleitungen identifiziert. Dies wurde durch den zusätzlichen Austausch in Form von Workshops und einer Schulung mit einem Hersteller solcher Komponenten sowie dem Weltmarktführer Swagelok validiert.

Zur Absicherung der entwickelten Konzepte wurden umfangreiche Simulationen für automatisierte Montageprozesse aufgebaut. Dazu zählten unter anderem die Entwicklung eines Montagekonzepts für die automatisierte Montage von Verbindungskomponenten sowie die simulationsgestützte Auslegung eines automatisierten Verschlauchungsprozesses, siehe Abbildung 11. Als Referenzprozess diente die Montage von Swagelok-Verbindungen, die sowohl simulierend als auch demonstrativ untersucht wurde, siehe Abbildung 12.

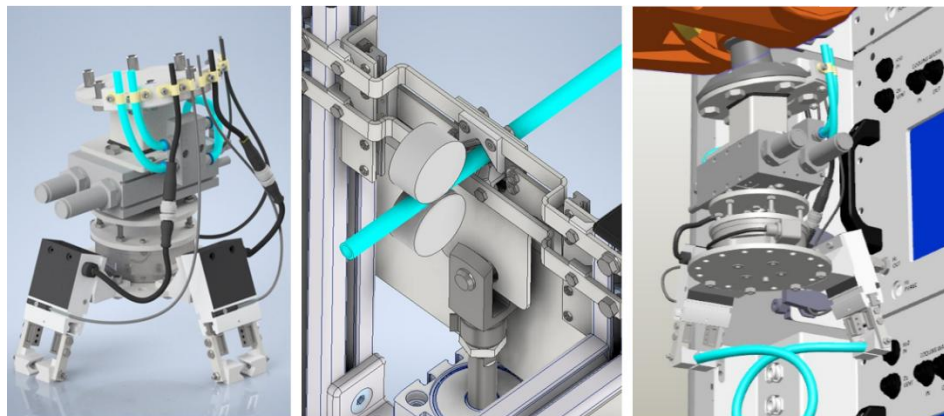


Abbildung 11: Automatisierte Verschlauchung: Endeffektor- und Prozessdarstellung

Gefördert durch:

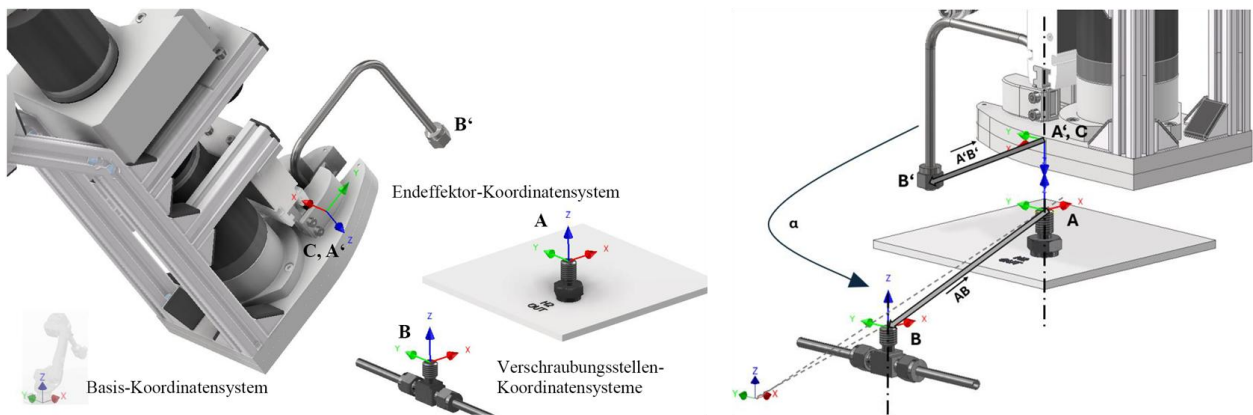


Abbildung 12: Automatisierte Rohrmontage: Endeffektor- und Prozessdarstellung zur Ermittlung des Fügewinkels

Darüber hinaus wurde ein innovativer Ansatz zur intralogistischen Wertschöpfung im Kontext automatisierter und kollaborativer Montage entwickelt. Dies umfasste neben der Untersuchung des Schwingungsverhaltens des Endeffektors eines mobilen Roboters bei mobiler Manipulation auch die Entwicklung eines exemplarischen Anwendungsfalls anhand einer Armaturentafel als Systemkomponente von Elektrolyseuren, siehe Abbildung 13. Zur systematischen Bewertung der Eignung von Prozessen für mobile Applikationen wurde eine Bewertungsmethodik erarbeitet, die sowohl die technische Machbarkeit als auch das wirtschaftliche Potenzial für die prozessspezifische Umsetzung von intralogistischer Wertschöpfung bewertet.

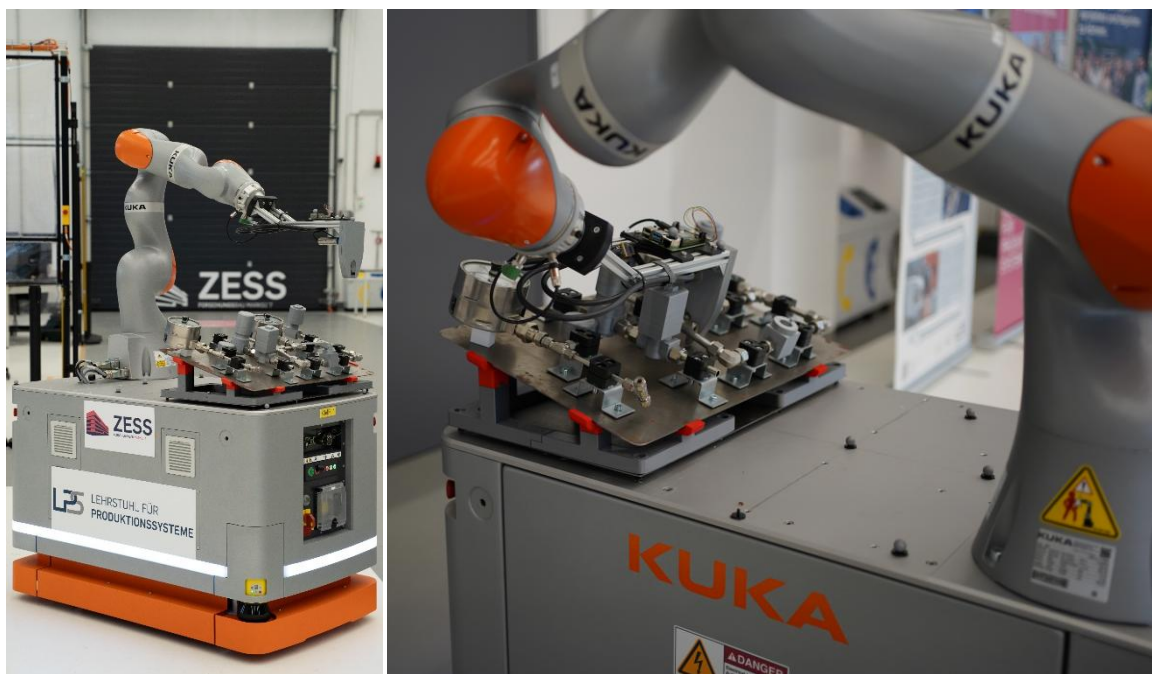


Abbildung 13: Automatisierte Verschlauchung: Endeffektor- und Prozessdarstellung

Ergebnisübersicht:

In AP5 wurden wesentliche methodische, technische und organisatorische Grundlagen für den Einsatz hybrider und vollautomatisierter Montagesysteme in der Elektrolyseurproduktion geschaffen. Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Entwicklung strukturierter Daten- und Bewertungsansätze zur Beschreibung und Analyse von Vormontage- und Montageprozessen.
- Definition und Validierung von über 30 Montageprozessen aus den Bereichen Verfahrenstechnik und Maschinenbau hinsichtlich ihrer MRK- und Automatisierungseignung.
- Aufbau von Bewertungsmodellen zum einen zur systematischen Einschätzung der Eignung von Prozessen für manuelle, automatisierte und kollaborative Ausführung und zum anderen zur Eignungsanalyse von mobilen Applikationen im Kontext der intralogistischen Wertschöpfung
- Identifikation signifikanter Automatisierungs- und Standardisierungspotenziale in der Schnittstellentechnik, insbesondere bei Rohren, Schläuchen und Kabeln.
- Entwicklung, Simulation und Demonstration automatisierter und MRK-gestützter Montageprozesse, unter anderem am Beispiel der Doppelklemmring-Swagelok-Verbindungen.
- Nachweis des Potenzials zur Koexistenz von Montage- und intralogistischen Prozessen unter Einsatz mobiler Roboter.
- Durchführung verschiedener Simulationen zu unterschiedlichen MRK-Zusammenarbeitungsgraden und zu vollautomatisierten Prozessen sowie Aufbau eines MRK-Sicherheitsdemonstrators, der auf der Messe Automatica 2022 in München ausgestellt wurde.
- Exemplarische Prozessentwicklung zur intralogistischen Wertschöpfung am Beispiel der automatisierten Verschraubung von Armaturentafel aus Elektrolyseuren, sowie Präsentation und Vorführung vor Vertretern aus Wirtschaft und Politik im ZESS u. a. dem damaligen Bundeskanzler Olaf Scholz, siehe Abbildung 14.
- Wissenstransfer in das Konsortium durch praxisnahe Workshops und Demonstrationen in der Lern- und Forschungsfabrik des LPS.

Insgesamt liefern die Arbeiten einen substanziellen Beitrag zur Flexibilisierung und Zukunftsfähigkeit hybrider und vollautomatisierter Montagesysteme für die industrielle Elektrolyseurproduktion und schaffen eine belastbare Grundlage für weiterführende Forschungs- und Implementierungsvorhaben.



Abbildung 14: Besuch des damaligen Bundeskanzlers Olaf Scholz im ZESS 2024

AP6: Identifikation, Entwicklung serieller Baugruppen

Kurzzusammenfassung:

Das sechste Arbeitspaket befasste sich mit der Identifikation und Entwicklung modularer Einheiten für großskalige Elektrolyseuranlagen. Ziel war es, verfahrensübergreifend nutzbare Komponenten zu bestimmen und diese unabhängig von den spezifischen elektrochemischen Verfahren auszugestalten. Die Ergebnisse wurden fortlaufend in die bereits dargestellte zentrale Datenstruktur überführt und für die in AP1 beschriebene Visualisierung nutzbar gemacht.

Detailbeschreibung:

Zu Beginn des Arbeitspakets wurde analysiert, welche Komponenten einer Elektrolyseuranlage verfahrensübergreifend standardisiert und damit als eigenständige Module ausgegliedert werden können. Dies umfasste die systematische Abgrenzung zwischen verfahrensspezifischen Modulen (z. B. AEM-Stack) und solchen, die unabhängig vom jeweiligen Elektrolyseverfahren ausgelegt werden können (z. B. Wasseraufbereitung).

Der LPS übernahm aufgrund des verfahrenstechnischen Fokus des Projekts eine unterstützende Rolle, insbesondere bei der strukturierten Datenhaltung der entwickelten Module. Über die gesamte Projektlaufzeit hinweg wurden die Ergebnisse der Modulentwicklung kontinuierlich in die Datenstruktur integriert, gepflegt und aktualisiert.

Ergänzend wurden die für die in Arbeitspaket 1 definierte Visualisierung relevanten Parameter gemeinsam spezifiziert. Dadurch wurde die Grundlage geschaffen, unterschiedliche Modularisierungskonzepte systematisch miteinander zu vergleichen und deren jeweilige Vor- und Nachteile sichtbar zu machen.

Ergebnisübersicht:

Das Arbeitspaket führte zu einer konsistenten und projektspezifisch nutzbaren Datenbeschreibung aller entwickelten Module. Diese Datenbasis stellt sowohl eine zentrale Informationsquelle für weitere Analysen als auch ein verbindliches Fundament für die projektspezifische Visualisierung und Bewertung der Modularisierungskonzepte dar.

AP7: Demonstration in einem Funktionsmuster

Kurzzusammenfassung:

AP7 dient der exemplarischen Demonstration und Validierung zentraler Projektergebnisse in Form eines integrierten Funktionsmusters. Die Gesamtverantwortung für dieses Arbeitspaket lag beim Projektpartner IBG, während der LPS unterstützend tätig war und insbesondere Beiträge in den Bereichen Simulation, Datenaustausch sowie hybride Montage einbrachte. Das Ziel war die modellhafte Abbildung und Demonstration teilautomatisierter Montageprozesse für großskalige Elektrolyseursysteme auf Basis unterschiedlicher Anlagenlayouts. Hierbei wurden insbesondere der durchgängige Datenaustausch zwischen den beteiligten Systemen, die Plausibilisierung simulationsbasierter Planungsergebnisse sowie die Validierung von Montageszenarien untersucht. Die Demonstration erfolgte anhand mehrerer Funktionsmuster, die bei Projekttreffen und gemeinsamen Workshops mit den Projektpartnern vorgestellt, evaluiert und iterativ weiterentwickelt wurden.

Detailbeschreibung:

Aufbauend auf den Ergebnissen der vorangegangenen Arbeitspakete, insbesondere AP5, zielte AP7 auf die integrierte Demonstration von Simulation, Datenaustausch und hybrider Montage in einem konsistenten Funktionsmuster ab. Während IBG die Gesamtkoordination und den Hauptteil des Aufbaus des Funktionsmusters übernahm, unterstützte der LPS die Umsetzung durch die Entwicklung und Bereitstellung des Teils des Gesamtsystems mittels simulationsgestützter Demonstratoren, die Konzeption und Realisierung automatisierter Verschraubungsprozesse sowie die methodische Begleitung der Validierungsprozesse.

Der modellhafte Aufbau der Elektrolyseurgroßanlage in unterschiedlichen Leistungsklassen (z. B. 200 MW, 500 MW, 1 GW) war dabei ein wichtiger Aspekt. Dazu wurden Kernprozesse wie Verbindungstechnologien sowie die Kombination mit dem Einsatz eines autonomen mobilen Roboters zur intralogistischen Wertschöpfung berücksichtigt. Die Demonstrationen sollten dabei sowohl die technische Machbarkeit als auch die systemische Plausibilität der entwickelten Konzepte aufzeigen. Ein wesentlicher Beitrag des LPS lag in der Bereitstellung simulationsbasierter Modelle, welche die komplexen Zusammenhänge und Skalierbarkeit der Großanlage sowie die Herausforderungen des Montageprozesses visuell abbildeten. Diese Simulationen dienten als Grundlage für Plausibilitätstests, bei denen bspw. die Abfolge der Prozessschritte sowie die zeitlichen Abläufe und Aufbaukonzepte wurden validiert. Die Visualisierung in Form von Videoclips ermöglichte den Projektpartnern, die Ergebnisse anschaulich zu bewerten und Feedback in iterative Optimierungsschleifen einzubringen. Auf diese Weise konnte das sogenannte Sim2Real-Gap systematisch reduziert werden.

Ein weiterer Kernbeitrag des LPS in AP7 war die Entwicklung, Umsetzung und Demonstration eines hochkomplexen Verschraubungsdemonstrators, der als wesentliches Funktionsmuster zur

Validierung hybrider Montageszenarien diente. Im Mittelpunkt stand hierbei die Konzeption eines multifunktionalen, modular aufgebauten Endeffektors, der speziell für die automatisierte Montage von Rohrverbindungen in Elektrolyseursystemen ausgelegt war, siehe Abbildung 15.

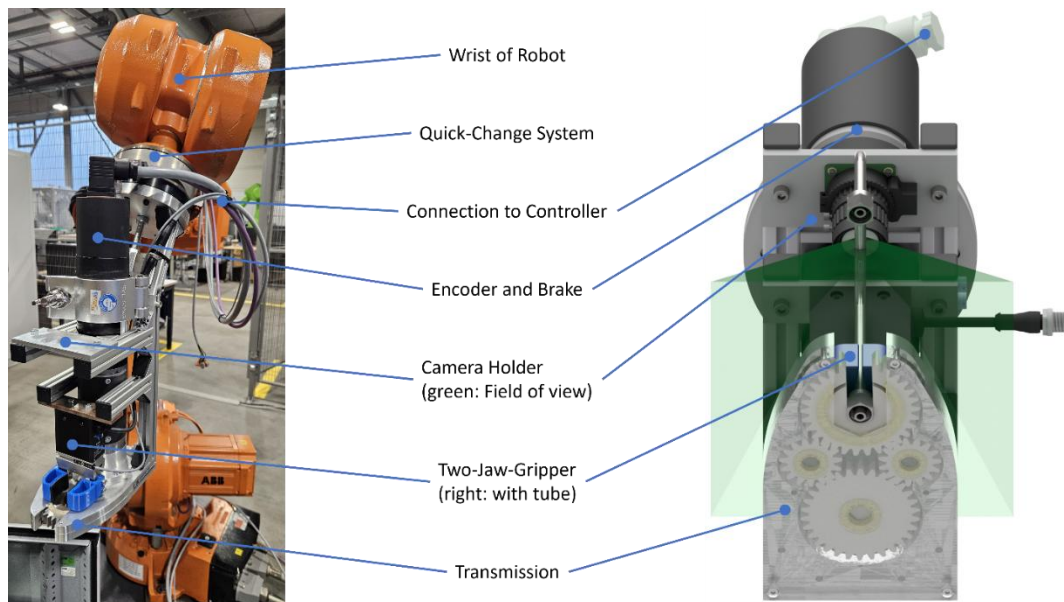


Abbildung 15: Aufbau und Umsetzung Endeffektor für die automatisierte Rohrverschraubung

Die Entwicklung des Endeffektors stellte aufgrund der hohen Varianz der Verbindungskomponenten, der engen Bauraumverhältnisse sowie der anspruchsvollen prozess- und sicherheitstechnischen Anforderungen eine besondere Herausforderung dar. Neben der mechanischen Konstruktion wurden umfangreiche sensorische und steuerungstechnische Komponenten integriert, um eine präzise Lageerkennung, eine adaptive Kraftregelung sowie eine prozesssichere Ausführung der Verschraubungsvorgänge zu ermöglichen, siehe Abbildung 16. Parallel zur Hardwareentwicklung erfolgte eine detaillierte Ausarbeitung der zugehörigen Montageprozesse, einschließlich der Greif-, Positionier-, Füge- und Verschraubungsstrategien.

Dabei wurden unterschiedliche Automatisierungsvarianten systematisch untersucht und hinsichtlich der Taktzeit, der Prozessstabilität, der Ergonomie und der Sicherheitsanforderungen bewertet. Die Prozessentwicklung basierte auf einer engen Verzahnung von Simulation und Realexperimenten, wodurch die iterative Optimierung der Bewegungsabläufe ermöglicht werden konnte. Der realisierte Verschraubungsdemonstrator diente als zentrale Referenzplattform zur Validierung der im Projekt entwickelten Konzepte zur durchgängigen Datenhaltung und zum standardisierten Datenaustausch entlang des gesamten Montageprozesses. Ein wesentlicher Schwerpunkt lag auf der Entwicklung robuster Schnittstellen zwischen den beteiligten Engineering-, Simulations- und Steuerungssystemen, um eine konsistente Übertragung prozessrelevanter Informationen sicherzustellen. Hierzu wurden spezifische Parser entwickelt, die eine automatisierte Transformation der in den Engineering-Werkzeugen erzeugten Datenformate in die für die Ausführung und Simulation erforderlichen Zielstrukturen ermöglichen.



Abbildung 16: Prozess der automatisierten Rohrverschraubung

Darüber hinaus wurde der vollständige Montageprozess in einer Verwaltungsschale (AAS) formal beschrieben und strukturiert abgebildet, sodass sowohl statische Anlageninformationen als auch dynamische Prozessparameter in einer einheitlichen, maschinenlesbaren Form bereitgestellt werden konnten, siehe Abbildung 17. Diese durchgängige Datenrepräsentation erlaubte eine medienbruchfreie Integration von Prozessplanung, Simulation und realer Ausführung und bildete die Grundlage für eine konsistente Synchronisation zwischen virtueller und physischer Ebene. Die erzielten Ergebnisse belegen die hohe Praxistauglichkeit des entwickelten Ansatzes zur Datenintegration und Schnittstellenstandardisierung und zeigen das erhebliche Potenzial einer durchgängigen, digitalen Prozesskette für die automatisierte Montage komplexer Verbindungskomponenten in der Elektrolyseurproduktion.

Die entwickelten Demonstratoren wurden im Rahmen mehrerer Projekttreffen sowie bei gemeinsamen Workshops am ZESS und an der LFF in Bochum präsentiert und gemeinsam mit den Projektpartnern evaluiert. Die direkte Einbindung der Industriepartner ermöglichte eine praxisnahe Validierung der entwickelten Konzepte und lieferte wertvolle Impulse für deren Weiterentwicklung.

Ergebnisübersicht:

In AP7 konnten zentrale Projektergebnisse erfolgreich in einem integrierten Funktionsmuster demonstriert und validiert werden. Der Beitrag des LPS in AP7 lässt sich dabei wie folgt zusammenfassen:

- Unterstützung der Gesamtumsetzung durch simulationsgestützte Demonstratoren zur Visualisierung komplexer Montage- und Logistikprozesse.
- Durchführung von Plausibilitätstests zur Bewertung der Simulationsmodelle und zur gezielten Reduzierung des Sim2Real-Gaps.

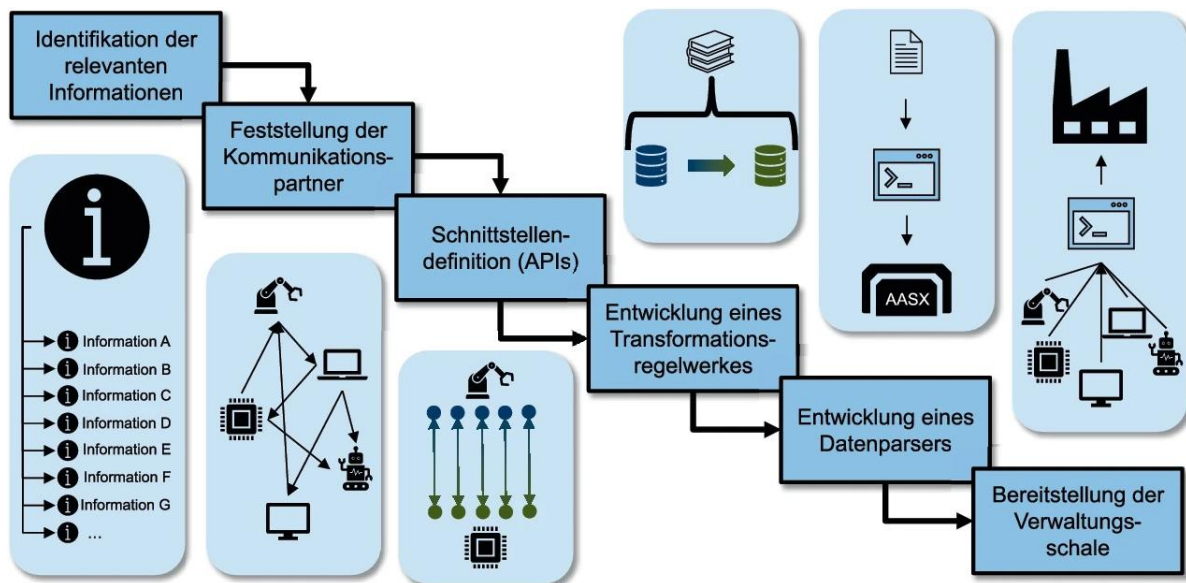


Abbildung 16: Vorgehensmodell zur Einführung der Verwaltungsschale

- Implizite Validierung des Datenaustauschs durch die konsistente Integration mehrerer Funktionsmuster in einer gemeinsamen Demonstrationsumgebung.
- Konzeption, Realisierung und Erprobung von Montageprozessen im Kontext der automatisierten Rohrverschraubung
- Enge Kooperation mit dem Projekt FertiRob bei der Entwicklung und Demonstration von MRK-Sicherheits- und Kollaborationskonzepten.
- Präsentation und Validierung der Demonstratoren im Rahmen von Projekttreffen und Workshops an den Standorten des LPS (LFF und ZESS).

Insgesamt leistete der LPS einen wesentlichen Beitrag zur praxisnahen Demonstration der im Projekt entwickelten Methoden und Technologien. Die erzielten Ergebnisse belegen die technische Machbarkeit und das hohe Anwendungspotenzial simulationsgestützter Planung, durchgängigen Datenaustauschs sowie hybrider Montagesysteme für die industrielle Fertigung großskaliger Elektrolyseuranlagen.

AP8: Dokumentation und Qualitätssicherung

Kurzzusammenfassung:

Im Arbeitspaket 8 wurde die Automatisierung zentraler Planungsprozesse mit Fokus auf Dokumentation und Qualitätssicherung umgesetzt. Methodisch wurden zwei komplementäre Pfade realisiert: das automatisierte Auslesen bestehender Projektdokumente zur Generierung eines konsistenten Datenmodells sowie die Ableitung normierter Artefakte (z. B. Stücklisten und Rechnungen) aus einem vorhandenen Datenmodell, exemplarisch auf Basis der Aufbaustruktur aus AP1. Zur Qualitätssicherung wurden standardisierte Schnittstellen geschaffen, die das Anheften und die revisionssichere Verwaltung von Prüfdokumenten ermöglichen; diese Schnittstellen wurden mithilfe der Projektergebnisse des IFPT befüllt. Ergänzend wurden Betriebs-Leistungsparameter kundenspezifischer Elektrolyseanlagen mithilfe der WindLib simuliert, visualisiert und in die technische Projektdokumentation integriert. Damit trägt AP8

wesentlich zur durchgängigen, interoperablen Datenhaltung und zur Standardisierung der projektrelevanten Informationsflüsse über den gesamten Anlagenlebenszyklus bei.

Detailbeschreibung:

Wie bereits erläutert, wurden im Rahmen des Arbeitspakets zwei komplementäre Wege der automatisierten Dokumentation realisiert, die nun detailliert beschrieben werden sollen:

Pfad 1:

Dieser adressiert die Ableitung eines konsistenten Datenmodells aus vorhandenen Engineering-Dokumenten, insbesondere aus R&I-Fließbildern (P&ID). R&I-Schemata in der Verfahrenstechnik weisen einen hohen Standardisierungsgrad auf und eignen sich daher besonders für eine automatisierte Analyse. Der Ausgangspunkt war ein Datensatz aus 500 R&I-Fließbildern. Für die Analyse der Fließbilder wurde der in Abbildung 17 dargestellte Workflow umgesetzt.

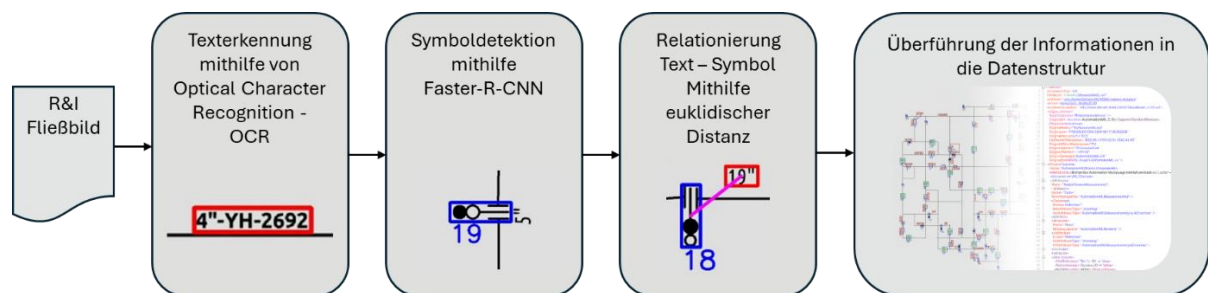


Abbildung 17: Workflow zur Analyse des R&I-Fließbilds

Das in den Workflow eingebrachte R&I-Fließbild wird zunächst einer Texterkennung (OCR) unterzogen, bevor die Symbole detektiert werden. Hierfür wurde ein Faster-R-CNN verwendet. Für die Zuordnung aus erkanntem Text zu identifiziertem Symbol wurde die euklidische Distanz beider Mittelpunkte ermittelt und unter der Annahme, dass Symbolbeschriftungen in nächster Nähe zum Symbol zu finden sind, ausgewertet. Abschließend wurden die erkannten Entitäten und Relationen in das in AP2 definierte Datenformat überführt.

Die Modelle wurden mit einem Trainings-/Validierungs-Split von 70:30 trainiert, wobei 350 R&I-Fließbilder für das Training und 150 für die Validierung verwendet wurden. Die Wahl des Splits folgt der Zielsetzung, einerseits ausreichend Varianz für das Lernen bereitzustellen und andererseits eine belastbare, datensatzexterne Evaluierung zu ermöglichen.

Modellergebnisse:

- Texterkennung (OCR): In 71 % der Fälle wurde der jeweilige Text korrekt erkannt. Damit liefert die OCR eine robuste Vorbefüllung, erfordert jedoch — insbesondere für kritische Bezeichner — eine qualitätssichernde Nachprüfung bzw. leichte regelbasierte Nachbearbeitung (z. B. Muster/RegEx für Tag-Formate).
- Symboldetektion (Faster-R-CNN): Es wurde ein F1-Score von 99,819 % erreicht und damit eine nahezu perfekte Erkennungsrate auf dem Validierungsdatensatz. Die hohe Symbolqualität stabilisiert die nachgelagerte Relationierung und kompensiert OCR-Unschärfen teilweise.
- Relationierung (Text ↔ Symbol): Die distanzbasierte Zuordnung erwies sich auf dem Datensatz als zuverlässig und effizient. In Grenzfällen (z. B. dicht beieinanderliegende Beschriftungen) ist eine Erweiterung um einfache Strukturregeln (Präfixe, erlaubte Muster) zweckmäßig.

Pfad 2:

Neben den beschriebenen Aspekten zu Pfad 1, der sich auf die Dokumentenanalyse konzentriert, wurden im Pfad 2 Arbeiten zur automatisierten Dokumentensynthese auf Basis von Dateninstanzen aus dem in AP2 definierten Datenmodell durchgeführt. Dabei konnten aus individuellen Dateninstanzen Rechnungen und Stücklisten automatisch erzeugt werden. Zudem wurden Dokumente erstellt, welche die geplanten kundenindividuellen Elektrolyse-Anlagedaten zusammenfassen. Auf Grundlage der Planung aus AP1, der Integration standortspezifischer Winddaten sowie der planungsgemäßen Leistungsfähigkeit des gesamten Elektrolyseurs und der angebotenen erneuerbaren Energieerzeuger wurde eine umfassende Leistungsübersicht erstellt. Im Mittelpunkt standen insbesondere die Darstellung der Leistungsaufnahme, der Elektrolyseleistung und des Wirkungsgrads. Die automatisierte Erstellung und Darstellung dieser Dokumente sind von besonderer Bedeutung, da so bereits in der Planungsphase relevante Informationen zeiteffizient an die Stakeholder übermittelt werden können. In Kombination mit den Simulationsmöglichkeiten aus AP1 sowie der effizienten Datenhaltung aus AP2 lassen sich die entsprechenden Dokumente bereits im Vertriebsprozess mit minimalem Aufwand erzeugen und unterstützen somit die Kaufentscheidung potenzieller Kunden wirksam.

Ergebnisübersicht:

Pfad 1 demonstriert, dass sich aus standardisierten R&I-Fließbildern automatisch strukturierte Datenmodelle ableiten lassen, die datendurchgängig weiterverwendet werden können. Die nahezu perfekte Symboldetektion minimiert den manuellen Aufwand, und die OCR-Ergebnisse beschleunigen die Dokumentation signifikant.

Pfad 2 zeigt den Mehrwert bereits bestehender standardisierter Datenmodelle exemplarisch für die automatisierte Erstellung projektrelevanter Dokumente. Auf Basis individueller Dateninstanzen konnten verschiedene technische und kaufmännische Artefakte vollständig automatisch generiert werden. Dazu zählen insbesondere anlagenspezifische Stücklisten, Rechnungsdokumente sowie kundenindividuelle Datenblätter für Elektrolyseanlagen. Durch die Verknüpfung des Datenmodells mit der im AP1 entwickelten Aufbaustruktur sowie der Integration standortspezifischer Winddaten wurde zudem eine automatisierte Ermittlung und Darstellung zentraler Betriebs- und Leistungsparameter ermöglicht. Insgesamt demonstriert Pfad 2, wie standardisierte Datenmodelle eine effiziente, konsistente und reproduzierbare Dokumentengenerierung ermöglichen.

AP9: Standardisierung

Kurzzusammenfassung:

Ziel des Arbeitspakets 9 war die Ableitung von Empfehlungen zur Standardisierung des Aufbaus großskaliger Elektrolyseure. Der Fokus lag auf einem durchgängigen, standardisierten Datenaustausch, der Definition einheitlicher physischer und informationstechnischer Schnittstellen sowie der Bewertung standardisierter Elektrolyse-Grundeinheiten und Verbindungstechnologien. Als zentrales Austauschformat wurde AutomationML in enger Abstimmung mit den anderen Projektpartnern eingesetzt.

Zentrale Ergebnisse sind die Festlegung einer standardisierten Positionierung physischer Schnittstellen an der Container-Stirnseite sowie deren prototypische Auslegung in Abstimmung

mit den Projektpartnern. Darüber hinaus wurde die Anwendung standardisierter Datenmodelle im Engineering-Prozess verankert und die Automatisierbarkeit unterschiedlicher Verbindungstechnologien systematisch bewertet.

Ergänzend wurden im Rahmen der Projektaufstockung KI-basierte Ansätze zur Skalierung und Optimierung großskaliger Elektrolyseure untersucht. Dabei wurde ein besonderer Fokus auf die KI-gestützte Rohrleitungsplanung auf Basis eines standardisierten 100-MW-Blocks gelegt.

Detailbeschreibung:

Grundlage der Baukastenarchitektur ist ein standardisiertes, modulares Datenmodell in AutomationML (AML). Die grundlegende Definition dieses Datenmodells sowie dessen Integration in den Wertschöpfungsprozess wurden bereits in Arbeitspaket 2 (AP2) beschrieben. Darauf aufbauend werden relevante Anlagenmodule als wiederverwendbare Bausteine in einem zentralen Teilekatalog abgelegt und für Konfiguration, Auslegung, Simulation und Visualisierung herangezogen.

Wie Abbildung 18 zeigt, sind die Bausteine in AML-Bibliotheken strukturiert. In der SystemUnitClassLib werden Balance-of-Plant-Komponenten (z. B. Wasseraufbereitung, Gas-System, Kühlung, Stromversorgung), Elektrolyseurkomponenten (z. B. AEM, PEM) sowie konstruktive Elemente (z. B. PipingStructure) als Klassen geführt. Die konkrete Anlagenkonfiguration entsteht durch Instanziierung und Zusammenbau in der InstanceHierarchy, beispielsweise als 100-MW-Anlage mit separaten PlantUnits für Steuerung, Wasser, Gas, Kühlung und Elektrolyse. Jedes Anlagenmodul liegt als AML/XML-Datei vor und enthält neben Typzuordnung (Rollen, Attribute) die standardisierten Schnittstellen- und Anschlussdaten. Dazu zählen insbesondere Ports mit eindeutigen Kennungen, exakten Positionen sowie Verbindungsdetails für die Rohrplanung. Als wesentlicher Standardisierungsbaustein wurden physische Schnittstellen an der Container-Stirnseite vereinheitlicht und prototypisch ausgelegt; für 40-ft-Container wurden hierfür Port-Anzahl, Port-Durchmesser und Port-Positionen definiert und mit Projektpartnern abgestimmt.

Die Umsetzung der Berechnung und Auslegung erfolgt, wie in AP2 beschrieben, in Microsoft Visual Studio, die Visualisierung erfolgt in Unity. Ergänzend wurden unterschiedliche Verbindungstechnologien im Hinblick auf ihre Automatisierbarkeit systematisch bewertet und als Grundlage für Standardisierungsempfehlungen herangezogen. Außerdem wurde der Referenzelektrolyseur aus dem H₂Giga-Projekt FertiRob datentechnisch angebunden.

Im Arbeitspaket 9 wurde eine zusätzlich automatisierte Rohrleitungsplanung auf Basis von Reinforcement Learning (RL) in Unity (Unity ML-Agents) erfolgreich umgesetzt und auf eine großskalige Elektrolyseanlage skaliert. Damit liegt ein funktionsfähiger, datengetriebener Planungsbaustein vor, der die Generierung kollisionsfreier Rohrverbindungen in einer dreidimensionalen Anlagenumgebung automatisiert. Die resultierenden Leitungsführungen werden strukturiert zur weiteren Nutzung im 3D-Layout bereitgestellt und eine Visualisierung der Ergebnisse ermöglicht.

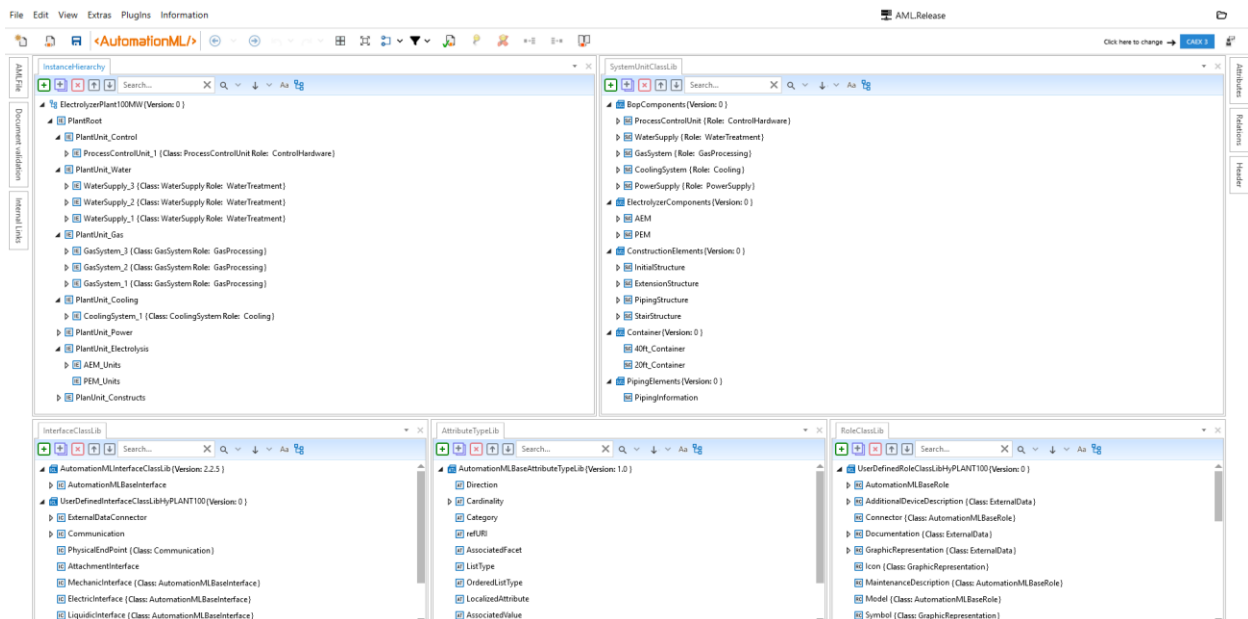


Abbildung 18: AutomationML-Datenmodell einer 100-MW-Elektrolyseanlage

Als Ergebnis aus Arbeitspaket 2 steht die 3D-Simulationsumgebung in Unity zur Verfügung, die die ElektrolyseurgröÙanlage mit ihren relevanten Anlagenkomponenten, Hindernissen und Restriktionsbereichen als feste Elemente abbildet und damit eine konsistente Grundlage für die Rohrplanung schafft. Die Rohrverbindungen werden verbindungs-basiert geplant, das heißt, pro Episode wird jeweils genau eine definierte Verbindung zwischen Start- und Zielpoint erzeugt. Der Agent generiert den Leitungsverlauf schrittweise, während die Umgebung kontinuierlich die Einhaltung der Rahmenbedingungen überprüft. Unzulässige Zustände, insbesondere Kollisionen mit der Anlagegeometrie, führen zu einem sofortigen Abbruch der Episode. Zusätzlich werden Konflikte mit bereits erzeugten Rohrsegmenten berücksichtigt, wodurch auch Rohrkollisionen zuverlässig erkannt werden. Dadurch werden keine Rohre geplant, die eine Kollision mit einem anderen bereits geplanten Rohr verursachen würden.

Die Bewertung und Optimierung der erzeugten Leitungen erfolgen über eine implementierte Reward-Funktion, die wesentliche planungsrelevante Kriterien formalisiert. Berücksichtigt werden dabei insbesondere die Minimierung der Gesamtlänge, die Reduktion von Biegungen, die Einhaltung von Standardbiegungen (90°), Kollisionsfreiheit sowie Aspekte der Zugänglichkeit und Wartbarkeit. Damit liegt ein Bewertungsmechanismus vor, der nicht nur die grundsätzliche Realisierbarkeit von Verbindungen sicherstellt, sondern auch die Qualität der Leitungsführung anhand definierter Kriterien verbessert.

Innerhalb der regulären Projektlaufzeit wurde zunächst eine Minimal-Lösung realisiert, mit der Rohrverbindungen für einen einzelnen Container (5-9 Verbindungen) automatisiert geplant werden konnten. Diese Lösung wurde im Standardbetrieb trainiert, das heißt, als lokale Unity-Ausführung im Editor bzw. als regulärer Build ohne Headless-Modus und ohne skalierte Parallelisierung. Das Training erfolgte mit einer einzelnen Trainingssession, um die Kernmechanismen: schrittweise Leitungsführung, Kollisions- und Restriktionsprüfung sowie Reward-basierte Bewertung zu validieren.

Im Rahmen der Projektaufstockung wurde die Umsetzung erheblich erweitert und auf einen vollständigen 100-MW-Block skaliert. Dabei wurde die Rohrleitungsplanung von einer Einzeldemonstration auf die vollständige Anlagenkonfiguration mit insgesamt 511 spezifischen Verbindungen ausgeweitet. Parallel zur inhaltlichen Skalierung wurde der Trainingsworkflow technisch umgestellt, um eine Variation und Bewertung von Reward-Designs und Hyperparametern zu ermöglichen.

Hierzu wurde ein Headless-Training (Build ohne grafische Ausgabe) erarbeitet und auf einer Nvidia H100 ausgeführt. Zur Erhöhung des Datendurchsatzes wurden mehrere Trainingsläufe parallelisiert: Es wurden 4 bis 8 Trainingssessions gleichzeitig betrieben, jeweils mit 8 Environments pro Session. Dadurch konnten unterschiedliche Trainingskonfigurationen, insbesondere Reward- und Hyperparameter-Varianten, zeitgleich ausgeführt, unter identischen Rahmenbedingungen verglichen und iterativ verbessert werden. Durch die Kombination aus Headless Betrieb, leistungsfähiger Hardware und Parallelisierung konnte die Trainingsdauer im Vergleich zu Standard-Workstations deutlich reduziert werden. Die Dauer eines einzelnen Trainingslaufs verringerte sich dabei um etwa 75 %. Berücksichtigt man zusätzlich die achtfache Parallelisierung, ergibt sich eine effektive Reduktion der Gesamttrainingszeit von rund 95 %. Ein direkter Vergleich ist jedoch nur eingeschränkt möglich, da sich die Systeme sowohl in der Hardware als auch in der Trainingskonfiguration unterscheiden. Die angegebenen Werte sind daher als praxisorientierte Effizienzgewinne und nicht als isolierter Leistungsvergleich zu verstehen.

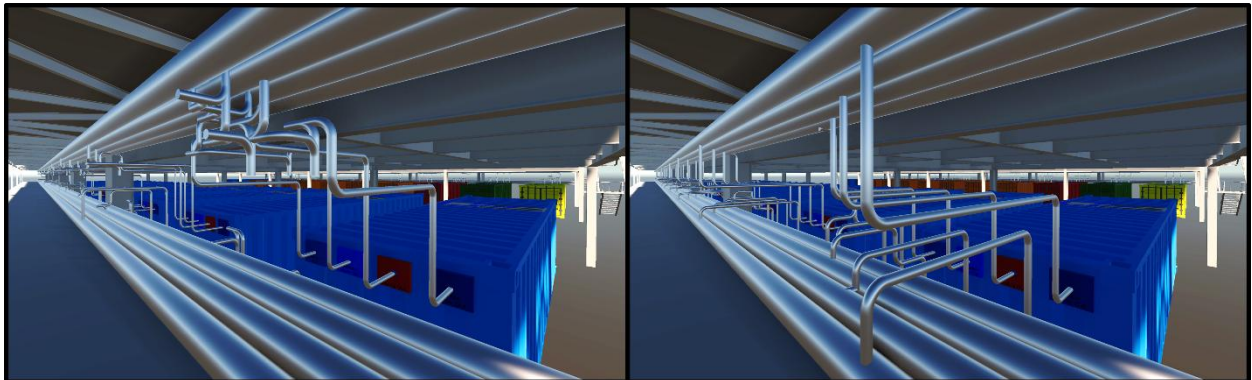


Abbildung 19: Vergleich zweier Trainingsstände der ML-Agents-basierten Rohrleitungsplanung

Zur Veranschaulichung des iterativen Optimierungsprozesses zeigt Abbildung 19 zwei Trainingsstände des ML-Agents. Links ist ein früherer Trainingsstand dargestellt, bei dem zwar kollisionsfreie Verläufe erzeugt werden, jedoch eine hohe Anzahl an Biegungen und Richtungswechseln entsteht. Außerdem ist erkennbar, dass lediglich die Verbindungen von Ports aus der oberen Reihe erstellt werden konnten. Durch eine gezielte Anpassung der Reward-Funktion, insbesondere eine stärkere negative Gewichtung der Biegungsanzahl, wurde das Modell weitertrainiert. Rechts ist das Ergebnis nach dem weiteren Training dargestellt: Die Leitungsführung weist sichtbar weniger Biegungen auf und folgt stärker einer gebündelten, geradlinigeren Trassierung, ohne die Einhaltung der harten Nebenbedingungen zu verletzen. Damit wird die Wirkung der Reward-basierten Formalisierung planerischer Zielkriterien im Sinne eines datengetriebenen, iterativen Verbesserungsprozesses nachvollziehbar.

Die Abbildungen 20 und 21 zeigen exemplarische Ergebnisse der automatisierten Leitungsführung an der 100-MW-Anlage. Dargestellt ist eine Detailansicht der Rohrführung sowie eine Gesamtansicht der Anlage über mehrere Ebenen. Die Visualisierungen verdeutlichen die erzeugten Routing-Ergebnisse innerhalb der vorgegebenen geometrischen und strukturellen Randbedingungen.

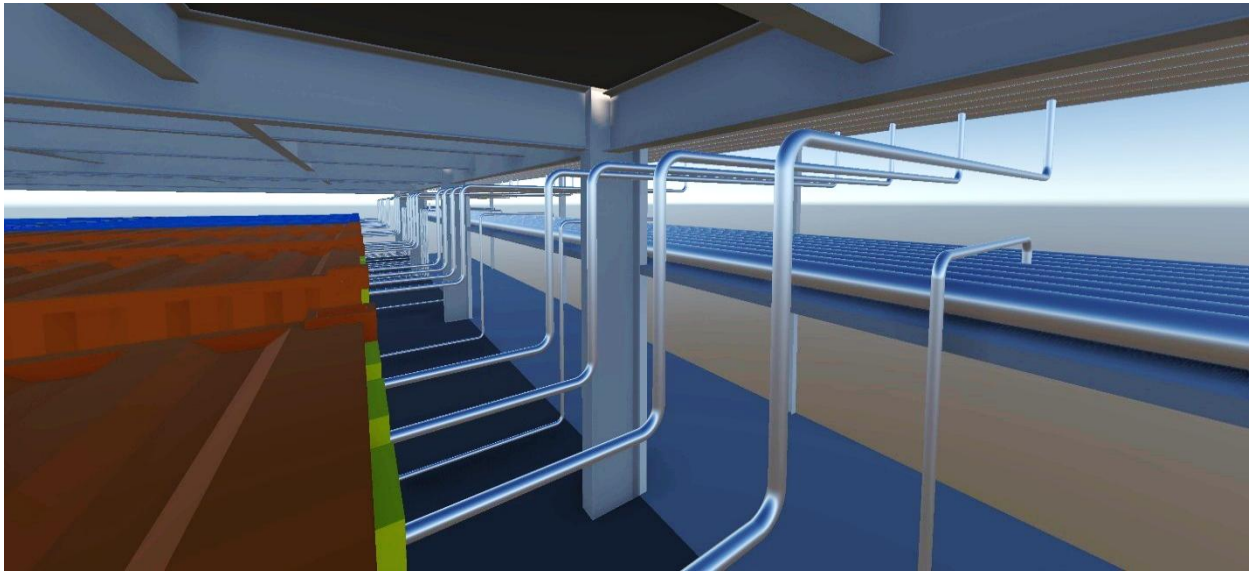


Abbildung 20: Visualisierung der Rohrverbindungen im gestapelten Aufbau der Container

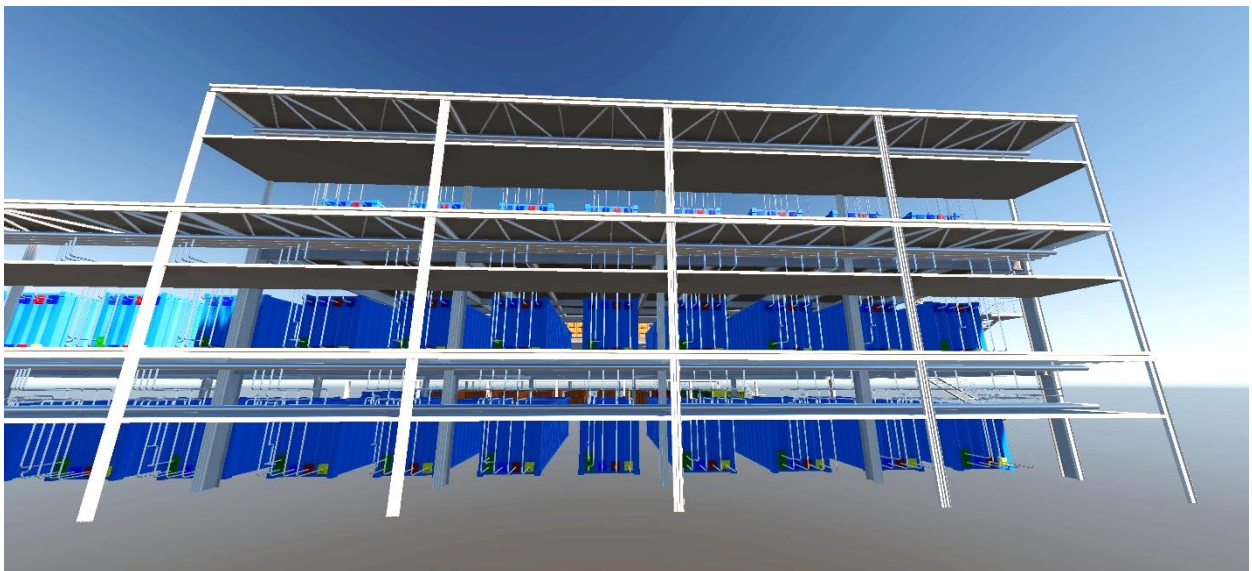


Abbildung 21: Seitenansicht des 100-MW-Elektrolyseurs im gestapelten Aufbau der Container

Als Projektergebnis in diesem Arbeitspaket liegt ein trainiertes Modell vor, das beim Erzeugen fehlerfreier Rohrverbindungen eine Erfolgsquote von ca. 99,02 % erreicht. Die Erfolgsdefinition basiert auf dem regulären Episodenabschluss durch Erreichen des Zielports unter Einhaltung der harten Nebenbedingungen, insbesondere der Kollisionsfreiheit und der Restriktionskonformität. Erfolgreiche Leitungsverläufe werden strukturiert erfasst und über definierte Schnittstellen in das 3D-Layout zurückgeführt. Damit steht eine belastbare Grundlage für eine automatisierte, iterative

Rohrleitungsplanung zur Verfügung, die sich in die bestehende digitale Planungsumgebung einfügt und den manuellen Aufwand bei der Leitungsführung deutlich reduziert.

Ergebnisübersicht:

In AP9 wurden Empfehlungen zur Standardisierung großskaliger Elektrolyseure erarbeitet und prototypisch beziehungsweise simulativ umgesetzt. Zentrale Ergebnisse sind die Festlegung standardisierter physischer Schnittstellen an der Container-Stirnseite einschließlich einer prototypischen Auslegung in Abstimmung mit den Projektpartnern, die Verankerung eines durchgängigen, toolübergreifenden Datenaustauschs auf Basis von AutomationML als zentralem Austauschformat sowie die systematische Bewertung der Automatisierbarkeit unterschiedlicher Verbindungstechnologien als Grundlage für Standardisierungsempfehlungen. Darüber hinaus wurde eine KI-gestützte Rohrleitungsplanung in Unity (Unity ML-Agents) auf Basis eines standardisierten 100-MW-Blocks mit 511 Verbindungen skaliert demonstriert. Hierzu erfolgte eine Umstellung auf Headless-Training und eine Parallelisierung auf einer Nvidia H100 zur gleichzeitigen Erprobung von Reward- und Hyperparametervarianten. Als Ergebnis wurde eine Erfolgsquote von ca. 99,02 % beim Erzeugen fehlerfreier Rohrverbindungen erreicht; erfolgreiche Routen werden strukturiert erfasst und über definierte Schnittstellen in das 3D-Layout zurückgeführt. Insgesamt belegen die Ergebnisse die technische Machbarkeit einer standardisierten, interoperablen Anlagenbeschreibung und zeigen ein hohes Automatisierungspotenzial für zentrale Engineering-Schritte.

AP11: Projektmanagement, Integration, Konzeption, Administration

Das Arbeitspaket 11 umfasste sämtliche organisatorischen, koordinativen und administrativen Tätigkeiten, die für den erfolgreichen Verlauf des Gesamtprojekts erforderlich waren. Darüber hinaus beinhaltete AP11 die strategische Außendarstellung des Projekts sowie die Kommunikation der erzielten Ergebnisse gegenüber Fachöffentlichkeit, Industrie und Politik. Wesentliche Beschreibungen hierzu finden sich im weiteren Verlauf des vorliegenden Dokuments, sodass an dieser Stelle auf eine umfassende Darstellung verzichtet wird.

AP4 und **AP10** sind kein Teil der LPS-TVB, sodass hier keine Arbeiten erfolgt sind.

Liste der Meilensteine

Nr.	Bezeichnung	Kriterium	Termin	Status
1	Erste Standortlayouts erstellt	Layouts für 200, 500 und 1.000 MW sind erstellt und enthalten die Parameter für Größe, Art und Anordnung der Elektrolyse-Grundeinheiten	März 2022	erledigt
2	Abschluss erster Simulationen (AP3)	Die Eignung der Automatisierungs- und MRK-Konzepte ist bestätigt; Grundlage zur Programmierung der Komponenten liegt vor	März 2023	erledigt
3	Erforschung der Steuerungstechnologien abgeschlossen Technischen Möglichkeiten zur Mensch-Maschine-Kooperation abgeschlossen (AP3 & AP5)	Simulationen sind abgeschlossen; Datenhaltung und datenbasierte Programmspezifikationen sind in AutomationML entwickelt; Umsetzungskonzept ist	Oktober 2023	erledigt

		aus spezifiziert und Einzelteile sind implementiert	
4	Beginn der modellierten Demonstration	Alle relevanten Zulieferungen sind zur Integration in Real- und Simulationsdemonstratoren bereit	Februar 2024 erledigt

Der **Meilenstein 1** wurde planmäßig erreicht. Ein 100 MW Layout wurde detailliert erarbeitet, weitere Leistungsklassen und Layouts lassen sich automatisiert, bis zu 1.000 MW ausgeben.

Der **Meilenstein 2** wurde planmäßig erreicht. Vorgehensmodelle zur Automatisierungs- und MRK-Eignung wurden validiert. Die Programmierbarkeit von Komponenten und Simulationen wurden am Demonstrator nachgewiesen. Simulationsmodelle sind für ausgewählte Beispiele evaluiert.

Der **Meilenstein 3** wurde planmäßig erreicht. Simulationen zur Automatisierungseignung wurden erarbeitet, wobei sowohl manuelle als auch automatisierte Prozesse in Betracht gezogen wurden. Datenhaltung und Programmspezifikation wurden gemäß AP3 umgesetzt. Ein Umsetzungskonzept zur Baustellenvormontage liegt vor, und Einzelprozesse sind bereits implementiert.

Der **Meilenstein 4** wurde planmäßig erreicht. Die MRK-Realisierungen sowie Robotersimulationen wurden für die Demonstration in einem Funktionsmuster zugeliefert. Die Erkenntnisse der akademischen Partner wurden von den industriellen Partnern auf Ihre Eignung zur Integration in bestehende und zukünftige Produktionssysteme untersucht. Es existieren Modelle und Abbildungen zum Aufbau eines großskaligen Elektrolysesystems, Kernprozesse sind in Demonstratoren umgesetzt (insbesondere in der Verbindungstechnologie in Form von Rohrverschraubungen).

2. Darstellung der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Im Rahmen des HyPLANT100-Teilprojektes des LPS werden zentral die drei Bereiche Simulation, Datenaustausch und hybride Montage bearbeitet. Die Bereiche wurden jeweils von wissenschaftlichen Mitarbeiter*innen in Vollzeit umgesetzt. Die Erforschung und Entwicklung einzelner spezifischer Funktionen/Methoden wurden gezielt durch Beschäftigte mit entsprechender Qualifikation (z. B. KI, Datenbank usw.) über einen begrenzten Zeitraum unterstützt. Die effiziente Bearbeitung der Projektinhalte konnte gewährleistet werden, indem ein wissenschaftlicher Mitarbeiter mit mehrjähriger Erfahrung für die Koordination eingesetzt wurde, in allen drei Bereichen konzeptionell mitarbeitete und insbesondere für eine teilprojektinterne, projektinterne sowie projektübergreifende Abstimmung der Inhalte verantwortlich war.

Für die Ausführung der KI-Arbeiten wurde ein KI-Rechnersystem angeschafft, das mit zwei NVIDIA H100-Graphikkarten ausgestattet ist und über ausreichend (Arbeits-)Speicherplatz verfügt, um die in den APs beschriebenen Simulationen umzusetzen. Bisherige Workstations brauchen insbesondere für das Training der Rohrleitungssimulation mehrere Tage, was durch große Parallelisierungen auf wenige Stunden Trainingszeit verkürzt werden konnte. Das KI-Rechnersystem hat damit einen großen Beitrag zum Erreichen der HyPLANT100-Projektziele geleistet.

3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Am LPS ist die Forschung überwiegend drittmittelbasiert und daher nur über Förderprojekte leistbar. Die personelle Grundausstattung des Lehrstuhls wird für die Erbringung der Lehre bzw. zur administrativen Aufrechterhaltung des Lehrstuhlbetriebs eingesetzt. Daher ist die Zuwendung für das im Projekt HyPLANT100 eingesetzte Personal erforderlich gewesen.

Im Bereich der Infrastruktur steht mit der oben bereits dargestellten Lern- und Forschungsfabrik (LFF) eine umfangreiche Ausstattung für die durchgeführten Forschungsarbeiten zur Verfügung.

Besonders hervorzuheben ist hier das als Forschungsgrößgerät im Jahr 2020 installierte und in Betrieb genommene Montagesystem COssembly. Dies dient hier der Erforschung verschiedenster Fragestellungen im Kontext der industriellen Montage sowie der Erweiterung des Lehrangebots für Studierende. Das Montagesystem hat COssembly mit seinem vollständigen virtuellen Abbild am LPS in Kombination mit bereits vorhandenen Kompetenzen sowie den abgerufenen Personalmitteln eine geeignete Infrastruktur geboten, um zahlreiche Forschungsfragen in den Bereichen Montage, Simulation, Mensch-Roboter-Kollaboration sowie mobiler Robotik im Kontext von HyPLANT100 zu erarbeiten. Auch der Forschungsbau ZESS (Zentrum für das Engineering Smarter Produkt-Service-Systeme) bot herausragende Bedingungen zur Umsetzung von Demonstratoren, beispielsweise im Bereich der mobilen Robotik, und stellt bis heute den Hannovermesse-Industrie-Demonstrator aus dem Jahr 2023 der interessierten Öffentlichkeit zur Ansicht zur Verfügung, sodass eine breitenwirksame Kommunikation, auch nach Projektende, sichergestellt ist.

Eine Eigenfinanzierung des für die Forschungsarbeiten in HyPLANT100 erforderlichen Personals war daher nicht möglich. Die angestrebte Vorgehensweise zur Erreichung der beschriebenen Ziele konnte aufgrund der hohen Komplexität der Thematik nur in gemeinsamer Zusammenarbeit von Forschung und Industrie umgesetzt werden. Das Konsortium in diesem Verbundprojekt bot aufgrund seines Know-hows optimale Rahmenbedingungen. Alle beteiligten Partner verfügten über einen breiten Erfahrungsschatz, der für die Umsetzung des Projekts notwendig war. Die zu erarbeitenden Ergebnisse setzten darüber hinaus eine intensive Kooperation zwischen Vertretern aus unterschiedlichen Branchen voraus. Die Interdisziplinarität der Themenstellung wurde durch die Zusammensetzung der Projektpartner aus Forschung und Industrie verdeutlicht.

4. Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit des Ergebnisses – auch konkrete Planungen für die nähere Zukunft - im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Beim H2Giga-Projekt HyPLANT100 handelt es sich um ein Vorhaben im nichtwirtschaftlichen Bereich der Ruhr-Universität Bochum, weshalb keine wirtschaftliche Verwertung geplant ist. Nachfolgend wird Bezug auf die wissenschaftlichen und/oder technischen Erfolgsaussichten der Verwertung genommen. Im Projekt wurde gezielt Know-how aufgebaut, um die bestehende Expertise des LPS in der Abteilung Produktionsautomatisierung zu sichern und weiter zu vertiefen. Gleichzeitig stärkt das Vorhaben die wissenschaftliche Konkurrenzfähigkeit des Lehrstuhls, insbesondere durch den Kompetenzausbau im Bereich der KI-basierten Simulation.

Die im Projekt HyPLANT100 entwickelten Themen werden gezielt weiterverfolgt. Dabei engagiert sich der LPS aktiv im AutomationML e. V. Durch dieses Engagement bringt sich der LPS direkt in die Weiterentwicklung und Standardisierung von AutomationML ein. So fließen Erfahrungen aus HyPLANT100, etwa zu notwendigen Spezifikationserweiterungen, direkt in die Gremienarbeit ein.

Der LPS wird die HyPLANT100-Themen, besonders in den Bereichen Simulation und MRK, zeitnah mit einem Horizont von zwei Jahren, in das Lehrangebot einfließen lassen. Als besonders geeignet erscheinen hier die Vorlesungen „3D-Simulation in der Automatisierungstechnik“ sowie „Grundlagen der Automatisierungstechnik“. Durch die Weitervermittlung an Studierende, aus denen auch der wissenschaftliche Nachwuchs des LPS in Teilen hervorgeht, wird das Know-how erhalten. Durch die weitere Vertiefung der Inhalte im Rahmen studentischer Facharbeiten sowie

Dissertationen und des zugehörigen Publikationswesens werden zudem die wissenschaftliche Sichtbarkeit, Konkurrenzfähigkeit und Position des LPS gestärkt.

Aufgrund der erzielten Ergebnisse haben sich im Verlauf des Projekts HyPLANT100 zahlreiche Anknüpfungsmöglichkeiten für Folgeprojekte ergeben. Hierbei sind zwei Richtungen besonders erwähnenswert: einerseits haben sich Fragestellungen ergeben, die umfassender im Grundlagenforschungsbereich erarbeitet werden sollten, und andererseits werden Ergebnisse und Lösungen entstehen, die – auch über das aktuelle HyPLANT100-Konsortium hinaus – in anwendungsnahen Forschungsvorhaben für die breitere Nutzung qualifiziert werden. Beispiele hierfür sind die Projekte SPP2443: EASY-MLS (FKZ: 543079297), AFARA (FKZ: EFRE-20800679), Schlauch-O-Mat (FKZ: KK5055223KU3), 2nd Life (FKZ: FKZ: KK5055234GR4) und ROptiVision (FKZ: KK5055225GR4), Robo-CircEL (FKZ: 01MN26020A).

Darüber hinaus bildet das in HyPLANT100 erarbeitete Wissen eine geeignete Basis, um das Zukunftsthema Produktion in der Wasserstoffbranche in Zukunft zu unterstützen und so die Wirtschaft zu stärken. Die Ruhr-Universität Bochum bietet als Volluniversität bereits zahlreiche interdisziplinäre Verknüpfungsmöglichkeiten, die vom LPS im Rahmen verschiedener Lehr- und Forschungsformate gestützt und genutzt werden. Als Beispiel sei hier der entstehende und im Januar 2022 in den Regelbetrieb gegangene Forschungsbau ZESS (Forschungszentrum für das Engineering Smarter Produkt-Service-Systeme, <http://www.ZESS.institute>) genannt. Hier werden weitere Themen, beispielsweise in Richtung Geschäftsmodelle, interdisziplinär adressiert, um die Wasserstoffherzeugungswirtschaft über die in HyPLANT100 vorrangig betrachteten Themen der Produktion(-sautomatisierung) hinaus zu bearbeiten.

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

Während der Projektlaufzeit fand insbesondere mit unserem LPS-Schwesterprojekt FertiRob ein kontinuierlicher wissenschaftlicher Austausch in der Abteilung Produktionsautomatisierung unter der Leitung von Patrick Adler statt. Hierbei konnten beide Projekte wechselseitig von den Erkenntnissen und Fortschritten des jeweils anderen profitieren. Zudem ergaben sich positive Effekte für die Lehre am LPS, da aktuelle Forschungsergebnisse direkt in die Lehrveranstaltungen integriert werden konnten. Parallel dazu fand ein Austausch mit weiteren H₂Giga-Partnern im Rahmen von Statuskonferenzen, Transfermeetings und individuellen Veranstaltungen statt. Es wurde ersichtlich, dass HyPLANT100 zwar ähnliche Themen bearbeitet, sich die Schwerpunktsetzung sowie die Lösungsansätze jedoch deutlich unterscheiden. Während der Durchführung hat kein anderes ähnliches Projekt außerhalb des H₂Giga-Verbundes den Projektverlauf negativ beeinflusst.

6. Liste der erfolgten oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr. 5 der NKBF/NABF

Im Projektzeitraum wurden die oben beschriebenen Ergebnisse in zahlreichen Veröffentlichungen publiziert, wodurch eine hohe wissenschaftliche Sichtbarkeit erreicht und der Wissenstransfer in die Fachcommunity aktiv gestaltet wurde. Eine Auflistung der Beiträge ist in Tabelle 1 aufgeführt. Tabelle 1: Auflistung der im Projektzeitraum veröffentlichten Publikationen

Jahr	Art	Titel, Quelle/Zitat (Journal, Konferenz)	Autoren	Link
2022	Vortrag	Automatisierte Produktion von Elektrolyseuren: Wie kann man Elektrolyseure in Zukunft wirtschaftlich fertigen?	Adler, P.; Elei, T.	Link
2022	Artikel	Grüner wird's nicht - oder doch?: Automatisierter Aufbau großskaliger Wasser-Elektrolyseure	Adler, P.; Elei, T.; Hypki, A.; Kuhlenkötter, B.	Link
2022	Artikel	Automatisierte Montage großskaliger Wasser-Elektrolyseure: Digitale Montageplanung für eine nachhaltige Wasserstoffwirtschaft auf Grundlage von Produkt, Prozess und Ressource	Adler, P.; Syniawa, D.; Jakschik, M.; Christ, L.; Hypki, A.; Kuhlenkötter, B.	Link
2022	Poster	Automatisierte Layouterstellung leistungsstarker Elektrolyseuranlagen		Link
2022	Artikel	Roboterprogrammierung mithilfe von AutomationML: Konzeptionierung einer automatischen Roboterprogrammerstellung auf Basis von AML	Jakschik, M.; Kuhlenkötter, B.; Hypki, A.	Link
2022	Artikel	Automatisierte Montage großskaliger Wasser-Elektrolyseure: digitale Montageplanung für eine nachhaltige Wasserstoffwirtschaft auf Grundlage von Produkt, Prozess und Ressource	Adler, P.; Syniawa, D.; Jakschik, M.; Christ, L.; Hypki, A.; Kuhlenkötter, B.	Link
2022	Poster	Automatisiertes Verschrauben von Wasserstoff-Fittings für den Aufbau großskaliger Elektrolyseure der Gigawattklasse	Adler, P.; Christ, L.; Kuhlenkötter, B.	Link
2023	Konferenz	Automated pipe routing in context of large-scale electrolyzer plants	Jakschik, M.; Syniawa, D.; Hypki, A.; Kuhlenkötter, B.	Link
2023	Konferenz	Automated data-driven dimensioning and planning of modular large-scale electrolysis plants	Syniawa, D.; Jakschik, M.; Hypki, A.; Kuhlenkötter, B.	Link
2023	Poster	HyPLANT100 – Automatisierter Aufbau großskaliger Elektrolyseure	Syniawa, D.; Jakschik, M.; Christ, L.; Schachtsiek, J.; Büsch, L.; Masuhr, C.; Adler, P.; Schüppstuhl, T.; Kuhlenkötter, B.	Link
2023	Konferenz	Enhanced Planning of Production Plants: A Case-Based Reasoning Driven Approach	Syniawa, D.; Egel, R.; Schachtsiek, J.; Hypki, A.; Kuhlenkötter, B.	Link
2023	Konferenz	Robot-based assembly of hydrogen tube fittings for large-scale electrolyzers	Adler, P.; Syniawa, D.; Christ, L.; Kuhlenkötter, B.	Link
2023	Konferenz	Synthetic Data Derived from a Digital Twin for an Error Compensation Algorithm of Hydrogen Tube Fitting Assembly	Christ, L.; Adler, P.; Schulte, L.; Kuhlenkötter, B.	Link
2023	Konferenz	Smart Production System for the Process-Reliable Assembly of Hydrogen Tube Fittings	Adler, P.; Christ, L.; Weckendrup, C.; Kuhlenkötter, B.	Link
2023	Journal	Implementation of Digital Twin and Real Production System to Address Actual and Future Challenges in Assembly Technology	Christ, L.; Milloch, E.; Boshoff, M.; Hypki, A.; Kuhlenkötter, B.	Link
2024	Journal	HyPLANT100: Industrialization from Assembly to the Construction Site for Gigawatt Electrolysis	Büsch, L.; Jakschik, M.; Syniawa, D.; Masuhr, C.; Christ, L.; Schachtsiek, J.; Haalck, K.; Nerlich, L.; Frömsdorf, E.; Schirmack, N.; Ebert, B.; Kirty, C.; Adler, P.; Schüppstuhl, T.; Kuhlenkötter, B.	Link
2024	Artikel	Elektrolyseure für grünen Wasserstoff	Adler, P.; Miro, M.; Kuhlenkötter, B.	Link
2024	Journal	Assessing the Suitability of Automation Using the Methods–Time–Measurement Basic System	Jakschik, M.; Endemann, F.; Adler, P.; Lamers, L.; Kuhlenkötter, B.	Link
2024	Konferenz	AI-supported evaluation application for product design assessment regarding automated production	Jakschik, M.; Thielmann, J.; Lamers, L.; Kuhlenkötter, B.	Link

Jahr	Art	Titel, Quelle/Zitat (Journal, Konferenz)	Autoren	Link
2024	Poster	HyPLANT100 - Modularisierung und Automatisierung für die Montage großskaliger Wasserelektrolyseure	Masuhr, C.; Christ, L.; Büsch, L.; Syniawa, D.; Jakschik, M.; Adler, P.; Kuhlenkötter, B.; Schüppstuhl, T.	Link
2024	Konferenz	Manipulator Vibration of Mobile Robots in the Context of Intralogistic Value Creation	Christ, L.; Schachtsiek, J.; Bier, A.; Kuhlenkötter, B.; Glogowski, P.	Link
2024	Konferenz	<i>Integrative Multi-Robot System for Advanced Manufacturing OPTIMA: combining Additive and Subtractive Processes.</i>	Schachtsiek, J.; Adler, P.; Kuhlenkötter, B.	Link
2024	Journal	Exploring Large Language Models in Industrial Robotics: Interacting with Simulation Systems and Validating AI-Generated Robot Code	Syniawa, D.; Boshoff, M.; Kuhlenkötter, B.; Katic, D.; Schuster, D.; Hesenius, M.	Link
2024	Artikel	Large Language Models in Der Robotik: Potenzial in Der Programmierung von Industrierobotern	Syniawa, D.; Ates, B.; Boshoff, M.; Kuhlenkötter, B.	Link
2024	Konferenz	Engineering Based Approach to Optimize Electrolyzer Production Plant Planning	Lamers, L.; Jakschik, M.; Kuhlenkötter, B.; Idris Yorgun; Hypki, A.	Link
2024	Journal	Human in the Collaborative Loop: A Strategy for Integrating Human Activity Recognition and Non-Invasive Brain-Machine Interfaces to Control Collaborative Robots	Pilacinski, A.; Christ, L.; Boshoff, M.; Iossifidis, I.; Adler, P.; Miro, M.; Kuhlenkötter, B.; Klaes, C.	Link
2024	Journal	Competency-Based Development and Implementation of a Learning Factory Environment for Human-Robot-Interaction	Knott, M.; Milloch, E.; Christ, L.; Dückershoff, T.; Kuhlenkötter, B.	Link
2025	Konferenz	Oscillation-Adaptive Sequence Planning in Production Processes for Mobile Robots	Christ, L.; Krieger, S.; Kuhlenkötter, B.	Link
2025	Konferenz	Robot-Based Assembly of Hydrogen Tube Fittings for Large-Scale Electrolyzers	Adler, P.; Syniawa, D.; Christ, L.; Kuhlenkötter, B.	Link
2025	Poster	HyPLANT100 – Automatisierung der Produktion von Elektrolyseuren größer ein Gigawatt	Krieger, S.; Christ, L.; Syniawa, D.; Jakschik, M.; Masuhr, C.; Büsch, L.; Adler, P.; Schüppstuhl, T.; Kuhlenkötter, B.	Link
2025	Konferenz	Automatisierung und Digitalisierung in der Wasserstoffherstellung: Konzeptuelle Einführung der Verwaltungsschale zur Effizienzsteigerung des Datenaustauschs	Große-Kreul, A. F.; Drees, T.; Luong, T.; Adler, P.; Kuhlenkötter, B.	Link
2025	Konferenz	Data Acquisition Approaches for Compensation Algorithms in Automated Water Electrolyzer Assembly	Krieger, S.; Christ, L.; Jakschik, M.; Syniawa, D.; Bahri, K.; Adler, P.; Kuhlenkötter, B.	Link

Neben fachlichen Publikationen wurden zahlreiche Präsentationen, Veranstaltungen und Besuche durchgeführt, die die Projektergebnisse einem breiten Publikum zugänglich machten. Hierzu zählten:

- Automatica 2022 – Vorstellung eines MRK-Messedemonstrators,
- Hannover Messe Industrie 2023 – Präsentation des Messedemonstrators mit Fokus auf Automatisierung, Robotik und Datenintegration, siehe Abbildung 22,
- Dauerhafte Präsenz im Forschungsbau ZESS – Integration der Demonstratoren und Projektergebnisse in die öffentlich zugängliche Forschungsinfrastruktur,

- Nordforum 2023 – Fachlicher Austausch mit Industrie- und Forschungspartnern aus dem norddeutschen Energiesektor,
- Besuch des Bundeskanzlers 2024 – diverse Projektpräsentationen unter anderem HyPLANT100.

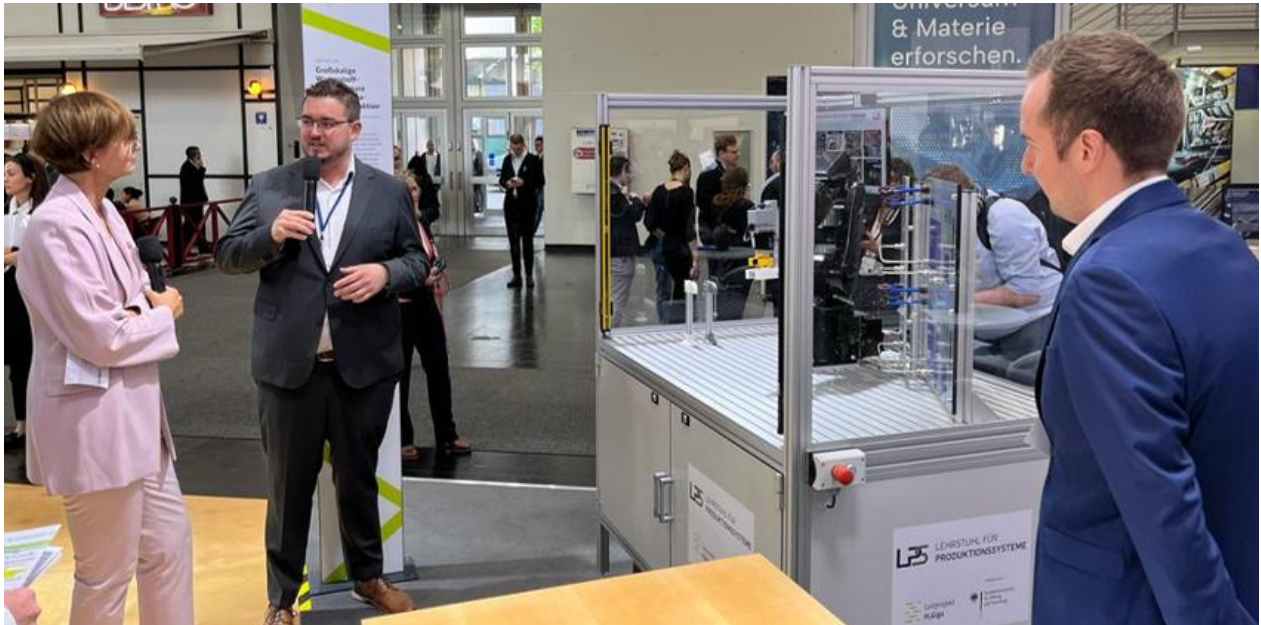


Abbildung 22: Besuch der damaligen BMBF-Ministerin Bettina Stark-Watzinger auf der Hannover Messe Industrie 2023

Diese Auftritte haben maßgeblich zur Wahrnehmung und Einordnung der Projektergebnisse in wissenschaftlichem, politischem und industriellem Kontext beigetragen.