

Hamburg, 13.03.2026

**Verbundvorhaben: H2Giga\_QT5.1\_HyPLANT100: Entwicklung optimierter  
und automatisierter Abläufe und Standards für den Aufbau großskaliger  
Wasserelektrolyseure;  
Teilvorhaben: Digitale Ablaufsteuerung zur Qualitätssicherung bei  
der skalierenden Montage von Großelektrolyseuren**

**Sachbericht zum Verwendungsnachweis - Teil II: Eingehende Darstellung**

---

Stand:	13.03.2026
Einreichungsdatum TIB (Teil I+II):	31.03.2026
Partnerin/Partner:	Technische Universität Hamburg – Institut für Flugzeug-Produktionstechnik
Autorinnen/Autoren:	C. Masuhr, L. Büsch
Fördertitel:	Verbundvorhaben H2Giga_QT5.1_HyPLANT100: Entwicklung optimierter und automatisierter Abläufe und Standards für den Aufbau großskaliger Wasserelektrolyseure
Laufzeit:	01.04.2021 bis 31.12.2025
Förderkennzeichen:	03HY114F
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

#### **AP 1 - Simulation von Aufbaustrukturen großskaliger Elektrolysesysteme**

Im Rahmen von AP 1 wurden die Grundlagen für die Aufbaustrukturen großskaliger Elektrolysesysteme durch die Entwicklung eines konfigurierbaren Baukastensystems und die Analyse funktionaler Module inklusive ihrer baulichen Abmaße erfolgreich erarbeitet. Zur Sicherstellung der Skalierbarkeit bis in den Gigawatt-Bereich erfolgte eine detaillierte Bewertung von Systemkonzepten hinsichtlich Steuerungstechnologie, Sensorik und integrierter Qualitätssicherung. Ein wesentliches Ergebnis bildet die methodische Trennung der Fertigungslogistik in eine hochautomatisierte Vormontage und eine manuelle Endmontage auf dem Baufeld, ergänzt durch eine technologieübergreifende BoP-Strategie mit definierten Qualitätsstandards. Parallel dazu wurden unter Berücksichtigung geltender Normen Szenarien für die Montage- und Prüfprozesse erstellt, wobei die Leckageprävention als kritischer Sicherheitsfaktor priorisiert wurde. Das IFPT begleitete das Arbeitspaket durch die kontinuierliche Ableitung und Einbringung technischer Anforderungen für die übergeordnete Steuerung und Qualitätssicherung.

#### **AP 2 - Ermittlung der Grundsatzparameter für Endmontagesysteme**

Im Arbeitspaket 2 wurden die informationstechnischen Grundlagen für die Endmontagesysteme erfolgreich definiert, wobei AutomationML (AML) als zentrale, befähigende Datenbasis für ein selbstkonfigurierendes Montagesystem etabliert wurde. Durch die Entwicklung standardisierter Klassen für Entitäten wie Roboterprogramme, Montagegeräte und Sensorik wurde eine flexible Struktur geschaffen, die neben der Interoperabilität auch die automatisierte Durchführung und Dokumentation von Prüfprozessen unterstützt. Das IFPT begleitete diesen Prozess durch die kontinuierliche Ableitung technischer Anforderungen an die Sensorintegration und die digitale Fortschrittsüberwachung. Damit wurde die notwendige Basis für eine strukturierte Datenablage und die lückenlose digitale Abbildung der Montage- und Qualitätssicherungsschritte an den Elektrolyseur-Kabinetten geschaffen.

#### **AP 3 - Erforschung der anwendbaren Steuerungstechnologien durch Nutzung intelligenter, innovativer Simulationssysteme**

Das Institut für Flugzeug-Produktionstechnik übernahm gemäß der Teilvorhabenbeschreibung die Leitung des Arbeitspaketes 3 und verantwortete in dieser Funktion die konzeptionelle sowie technologische Umsetzung der digitalen Montageorchestrierung. Im Rahmen der theoretischen Vorarbeiten wurde AutomationML als zentrales Austauschformat implementiert, um die Interoperabilität zwischen Sensorik, Dokumentation und den verschiedenen Steuerungstechnologien sicherzustellen. Zur Identifikation automatisierbarer Abläufe erfolgte in enger Kooperation mit der FEST GmbH eine detaillierte Analyse der IST-Montageprozesse bei der Fertigung von Megawattelektrolyseuren nach dem Baustellenprinzip.

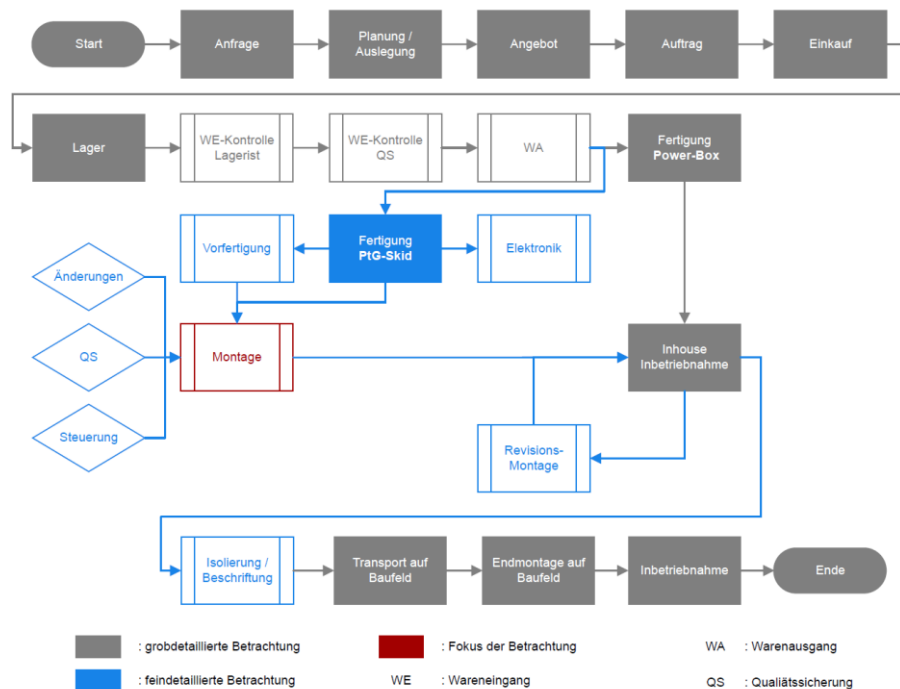


Abbildung 1: Flussdiagramm des IST-Zustandes der Fertigung in Kooperation mit der FEST GmbH

Die softwareseitige Umsetzung der Montageorchestrierung umfasste die Entwicklung einer Systemarchitektur, die sowohl für die stationäre Vormontage als auch für mobile Baufeld-Einsätze zur Steuerung des Auftragserfüllungsprozesses ausgelegt ist. Als logische Grundlage für die automatisierte Ablaufsteuerung wurden digitale Montagepläne sowie Montagevorranggraphen erstellt und in das System integriert. Die Realisierung der Orchestrierung erfolgte als Web-Applikation in einer Cloud-Umgebung, die über eine spezifisch gestaltete grafische Benutzeroberfläche zur Echtzeit-Werkerführung verfügt. Durch die Implementierung einer bidirektionalen Datenpipeline konnten die Informationsflüsse zwischen der Planungsebene und der operativen Ausführung am Montageplatz nahtlos synchronisiert werden.

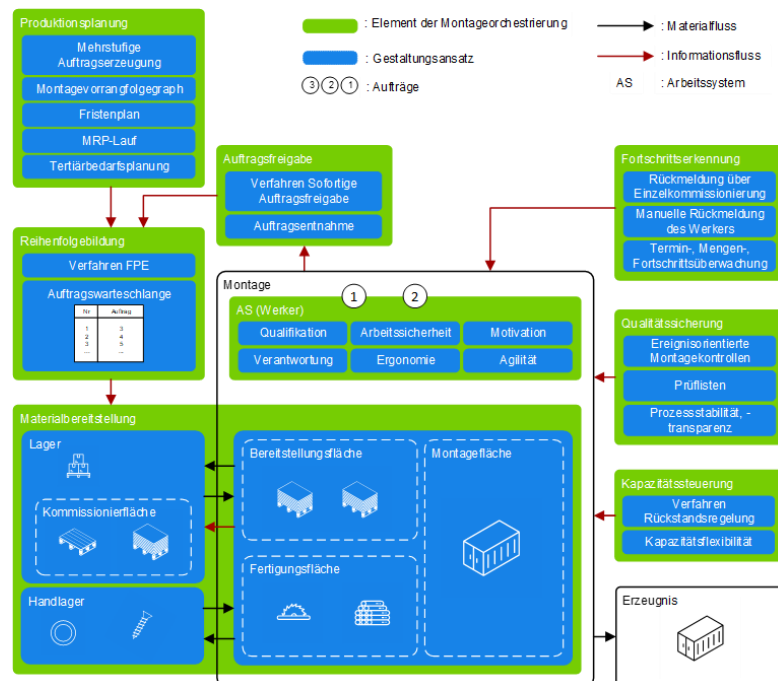


Abbildung 2: Montageorchestrierung nach den Informationsflüssen zur Steuerung des Auftragserfüllungsprozesses.

Ein wesentlicher wissenschaftlicher Schwerpunkt lag in der Entwicklung einer KI-basierten Fortschrittsüberwachung, die als sensorische Grundlage für die automatisierte Rückmeldung von Montagezuständen fungiert. In diesem Kontext wurde der HARDAT-Datensatz [10] generiert und veröffentlicht, welcher eine spezialisierte Datenbasis für die Erkennung menschlicher Montageaktivitäten (Human Action Recognition) und die Identifikation verwendeter Werkzeuge darstellt. Die hohe wissenschaftliche Relevanz dieser Entwicklungen spiegelt sich in mehreren Fachpublikationen wider: So wurden die Methoden zur KI-gestützten Aktivitätserkennung im Fachjournal *Sensors* (2023) [5] sowie im Journal *Hydrogen* (2024) [8] detailliert beschrieben. Ergänzende Arbeiten zur algorithmischen Fortschrittserkennung im Bereich der manuellen Montage wurden zudem im Rahmen der *Procedia CIRP* [2] veröffentlicht und auf internationalen Fachkonferenzen wie der *Global Conference on Sustainable Manufacturing* [10] der wissenschaftlichen Peer-Group präsentiert. Durch die Evaluation verschiedener HAR-Architekturen konnte die Erkennungsleistung für montagespezifische Aufgaben optimiert und eine echtzeitfähige Datenpipeline realisiert werden, die KI-generierte Fortschrittmeldungen unmittelbar für die dynamische Steuerung in der Web-Applikation bereitstellt.

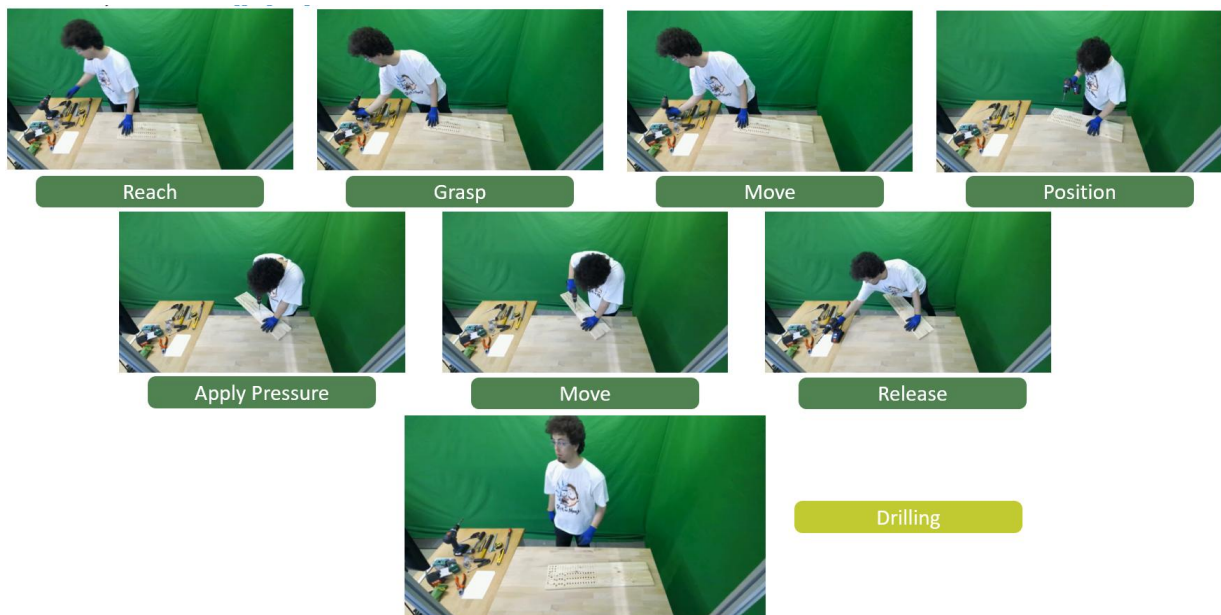


Abbildung 3: Visualisierung des HARDAT-Datensatzes [10] mit montagespezifischen Labels zur Aktivitäts- und Werkzeugerkennung

Abschließend wurde am Institut ein Versuchsstand instrumentiert, um die entwickelten Softwarelösungen unter kontrollierten Bedingungen zu erproben. Die erfolgreiche Zusammenführung der KI-gestützten Fortschrittserkennung und der Orchestrierungs-Software bildete die notwendige Voraussetzung für die anschließende Systemintegration in den funktionalen Gesamtdemonstrator und sicherte den erfolgreichen Abschluss der antragsgemäßen Entwicklungsziele in AP 3.

#### AP 4 - Ermittlung der Parameter für eine innovative Sensorintegration

Das Arbeitspaket 4 befasste sich mit der Ermittlung der Parameter für eine innovative Sensorintegration, um die im Vorhaben angestrebte Orchestrierung und Qualitätssicherung technologisch abzusichern. Gemäß den Zielen der Gesamtvorhabenbeschreibung wurden hierfür Sensortypen ausgewählt sowie Daten- und Schnittstellenformate spezifiziert. Zu Beginn erfolgte eine detaillierte Analyse der Baustellenmontage als maßgebliche Organisationsform, wobei die Anforderungen an eine flexible Sensorik in einem unstrukturierten Umfeld definiert wurden. Eine methodische Abgrenzung zwischen manuellen Tätigkeiten und dem Einsatz mobiler Robotik bildete die Grundlage für die weitere Auswahl der Sensorsysteme. In diesem Kontext wurden ergänzende Anforderungen für die Baufeldmontage im Außenbereich hinsichtlich der Robustheit der Sensorik gegenüber Umwelteinflüssen betrachtet, um eine breite Anwendbarkeit sicherzustellen [2].

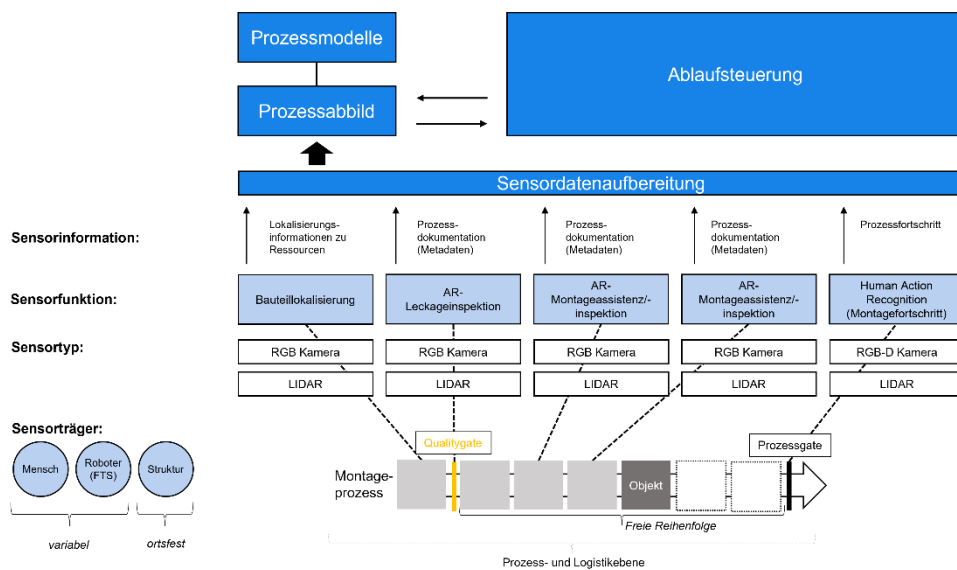


Abbildung 4: Systematischer Vergleich und Gegenüberstellung geeigneter Sensortechnologien zur Leckagedetektion und Lokalisierung

Ein Kernbestandteil der Arbeiten war die Evaluation spezialisierter Sensorsysteme für die unterschiedlichen manuellen und automatisierten Prozessschritte. Für die Fortschrittserkennung in der manuellen Montage wurde ein Motion-Tracking-System untersucht und ausgewählt, welches die notwendigen Bewegungsdaten für die KI-basierte Ablaufsteuerung liefert. Davon abgegrenzt erfolgte für die Qualitätssicherung die Auswahl tragbarer Sensoren zur manuellen, handgeführten Leckagedetektion [3]. Um diese Prüfprozesse digital zu unterstützen, wurde zusätzlich ein spezifisches Tracking-System zur Lokalisierung der AR-Anwendung evaluiert, welches die präzise Einblendung von Prüfinformationen im Raum ermöglicht und in unstrukturierten Umgebungen mobil einsetzbar ist. Parallel dazu wurde die Sensorik für die automatisierte Inspektion durch umfassende Sensorsimulationen abgesichert. Im Fokus standen dabei die Untersuchung und Planung roboterbasierter Sensortrajektorien. Durch die simulative Vorwegnahme der Bewegungsbahnen am digitalen Modell eines Elektrolyseur-Skids konnte die lückenlose Abdeckung der Prüfbereiche sowie die Kollisionsfreiheit der Sensorführung bereits vor der physischen Systemintegration sichergestellt werden.

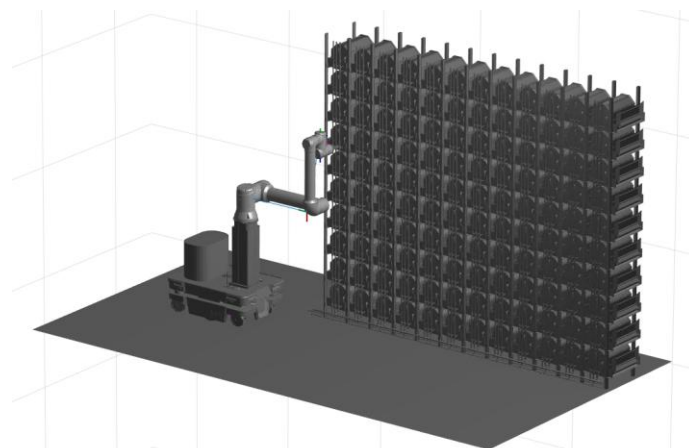


Abbildung 5: Sensorsimulation zur Untersuchung und Planung roboterbasierter Sensortrajektorien am Beispiel eines Elektrolyseur-Skids

Für die digitale Integration wurde AutomationML (AML) als zentrales Austauschformat herangezogen, um eine herstellerunabhängige Kommunikation zwischen Sensorik, Steuerung und Datenbank sicherzustellen. Es wurden Schnittstellenformate definiert, welche die Übertragung von Sensordaten via MQTT in eine Cloud-Plattform ermöglichen und damit die Grundlage für einen Digitalen Zwilling der Prüfprozesse schaffen. Die prozessseitige Einbindung erfolgte durch die Verknüpfung der Sensorinformationen mit der Montagefortschrittslogik sowie die Implementierung in ein AR-gestütztes Assistenzsystem zur Werkerführung. Durch die Spezifikation dieser Daten- und Schnittstellenformate wurden alle im Antrag geforderten Voraussetzungen für die beteiligten Modelle und Steuerungen erfolgreich umgesetzt.

### **AP 6 - Identifikation, Entwicklung serieller Baugruppen**

Im Arbeitspaket 6 begleitete das IFPT die Spezifikation serieller Kabinettstrukturen, um deren Fertigung mittels Mensch-Roboter-Kollaboration (MRK) zu ermöglichen. Der Fokus der Arbeiten lag auf der Ableitung und Einbringung technischer Anforderungen in den Bereichen Steuerungstechnologie, Sensorik und Qualitätssicherung. Durch diese Zuarbeit wurde sichergestellt, dass die Gestaltung der Kabinett-Komponenten und deren Interfaces die notwendigen Voraussetzungen für eine (teil-)automatisierte Vormontage sowie eine begleitende Qualitätsprüfung erfüllen. Dies bildet eine wesentliche Grundlage für die angestrebte Produktstandardisierung und den effizienten Scale-Up der Systeme.

### **AP 7 - Demonstration in einem Funktionsmuster**

Im Arbeitspaket 7 erfolgte die physische Zusammenführung der Forschungsergebnisse in einem Funktionsmuster am IFPT mit dem Ziel, die (teil-)automatisierte Montage und Prüfung von Elektrolyseur-Kabinetten unter realitätsnahen Bedingungen zu validieren. Zentraler Bestandteil des Versuchsaufbaus ist ein auf die besonderen Anforderungen hin konzipiertes und als Gesamtsystem beschafftes mobiles Robotersystem, welches aus einer MiR-Plattform, einem kollaborativen Roboter des Typs UR10e sowie einer vertikalen Liftachse als siebte kinematische Komponente besteht. Durch dieses spezifische Systemdesign wurde der vertikale Arbeitsraum signifikant erweitert, um die prozesssichere Bearbeitung großskaliger Bauteile zu ermöglichen.



Abbildung 6: Mobiles Robotersystem bestehend aus MiR-Plattform, Liftachse und UR10e-Cobot

Parallel dazu wurde am Institut ein spezialisierter Versuchsstand für manuelle Montageprozesse realisiert, der aus einer Werkbank für Kabinett-Komponenten und einer umfassenden Instrumentierung mit einem Motion-Tracking-System besteht. Diese Bewegungserfassung dient als technologische Basis für die Befähigung digitaler Assistenzsysteme, da sie eine präzise Kontextsensitivierung ermöglicht. Hierdurch sind die Assistenzsysteme in der Lage, den aktuellen Montagefortschritt in Echtzeit zu erkennen und dem Werker situative Unterstützung anzubieten. In diesem Zusammenhang wurde die softwareseitige Einbindung der KI-gestützten Fortschrittserkennung und der Montageorchestrierung gezielt für den Einsatz am manuellen Montageplatz entwickelt und implementiert, um hybride Arbeitsabläufe zwischen Mensch und Assistenzsystem effizient zu steuern.

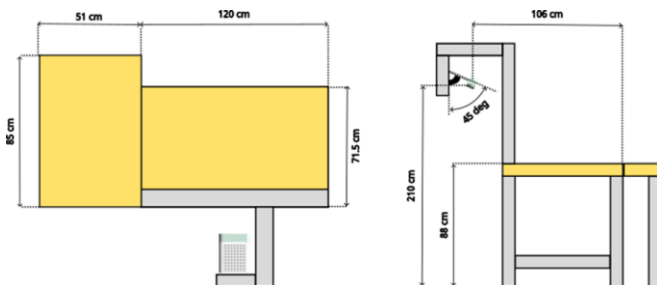
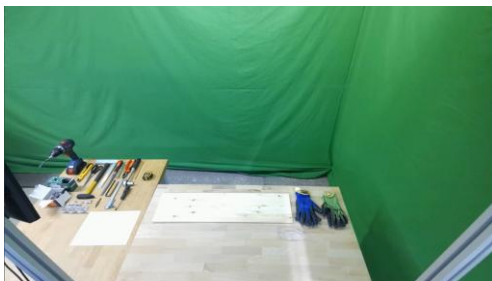


Abbildung 7: Manueller Montage-Versuchsstand inklusive Bewegungserfassung und Werkerführung

Zur wissenschaftlichen Absicherung der Qualitätsprüfung wurde der Versuchsstand um einen Leckage-Prüfstand erweitert, der in der Lage ist, unterschiedlichste realitätsnahe Leckageszenarien und -geometrien reproduzierbar zu erzeugen. Um einen präzisen Volumenstrom sicherzustellen, kamen Volumenstromregler zum Einsatz, die unterschiedliche Messbereiche des Gasflusses abdecken (siehe Abb. 8). Die softwareseitige Ansteuerung der mobilen Plattform während der Prüfzyklen wurde über eine ROS2-Umgebung auf einem Einplatinencomputer realisiert. Ergänzend dazu kam ein AR-Assistenzsystem zum Einsatz, das den Werker visuell durch die manuelle Leckagedetektion und -lokalisierung leitet und auf Basis prozessbegleitender Daten eine lückenlose Dokumentation ermöglicht. Zur Steigerung der Sensitivität und Effizienz bei der automatisierten Prüfung wurden zudem spezifische, 3D-gedruckte Ansauggeometrien konstruiert und kalibriert. Über die geschaffenen Schnittstellen lassen sich die generierten Qualitätsdaten (z. B. zur Verschraubungsqualität und Leckageprüfung) direkt in die Ablaufsteuerung integrieren und mit den digitalen Begleitmodellen der jeweiligen Einzelkomponenten verknüpfen.

Die abschließende Funktionsvalidierung der digital orchestrierten Montage- und Qualitätssicherungsprozesse wurde am physischen Gesamtdemonstrator am Standort des IFPT in Hamburg durchgeführt. Diese Validierung erfolgte unter direkter Einbindung von Fachpersonal des Verbundpartners TC Hydraulik (TCH). Durch die Durchführung der Demonstration in den Räumlichkeiten des Instituts konnte ein effektiver Ergebnistransfer sichergestellt und gleichzeitig der erhebliche Transportaufwand für das großskalige Funktionsmuster minimiert werden, was die Effizienz der abschließenden Projektphase maßgeblich steigerte.

## AP 8 - Dokumentation und Qualitätssicherheit

Das Arbeitspaket 8 fokussierte sich auf die Festlegung von Prüf- und Dokumentationsprozessen im Kontext des Aufbaus großskaliger Elektrolyseure mittels automatisierter Montage. Im Vorfeld der technischen Entwicklung wurde dafür zunächst eine umfangreiche Analyse der notwendigen Qualitätsmanagementprozesse durchgeführt, um detaillierte Anforderungen an die Qualitätssicherung sowie vollständige Prüfprozesse zu definieren. In diesem Zuge wurden besonders kritische Abläufe für die spätere Umsetzung identifiziert und priorisiert [3]. Die mobile Leckageprüfung sowie die Kontrolle manueller Verschraubungen (Klemmringverbinder) wurden dabei zusammen mit den Projektpartnern als zentrale Kernprozesse für die Validierung ausgewählt.

Um den Umfang der benötigten Sensorik für diese Qualitätssicherungsaufgaben zu bestimmen und auszuwählen, wurde nach der Festlegung auf die Leckageprüfung als zentralen Prozess zunächst ein finaler Prüfstand konzipiert und umgesetzt. Dieser ermöglichte die realitätsgetreue Erzeugung von reproduzierbaren Leckagen auf Basis der spezifischen Anforderungen von Elektrolyseuren (insbesondere an Armaturentafeln). An diesem Prüfstand wurden die wesentlichen Einflussfaktoren auf die Prozessführung systematisch hergeleitet. Dies umfasste die Gegenüberstellung verschiedener Sensorarten (H<sub>2</sub>-Sniffer verschiedener Technologien vs. BOS-Technik) sowie die geometrische Gestaltung der Einsaugung. Durch umfangreiche dynamische Versuche und detaillierte Parameterstudien, bei denen Faktoren wie Verfahrgeschwindigkeit, Ausrichtung, Abstand und Volumenströme evaluiert wurden, konnten belastbare Prüfstrategien für die manuelle und vollautomatische Sensorführung abgeleitet werden. Darüber hinaus wurde der Prüfstand auch im Rahmen einer Nutzerstudie, welche die manuelle Performance in der Leckageinspektion untersuchte, verwendet und erfolgreich evaluiert.

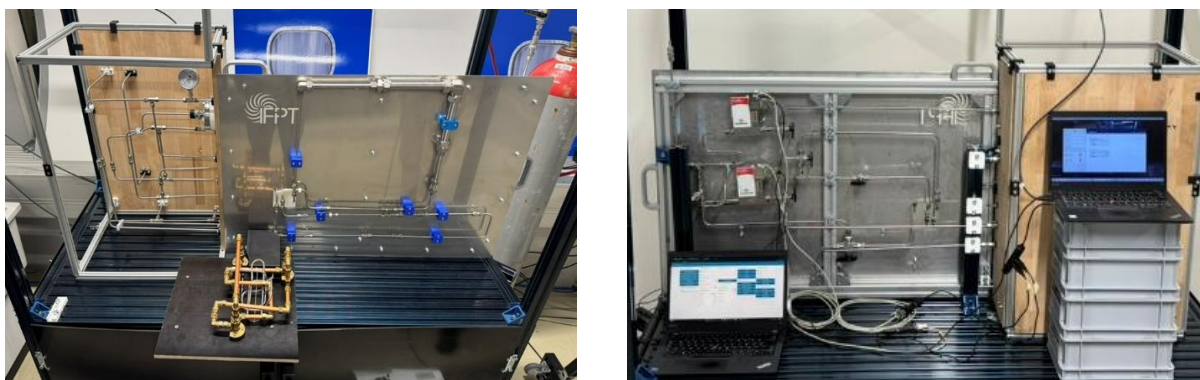


Abbildung 8: Prüfstand mit komplexen realitätsnahen Leckageszenarien an Armaturentafeln

Zur virtuellen Absicherung und Überführung dieser Strategien in die Praxis wurde eine komplexe CFD-Gassimulation (Computational Fluid Dynamics) aufgebaut. Diese diente dem direkten Abgleich mit den experimentell am Prüfstand erhobenen Messdaten und ermöglichte die Simulation des Gasverhaltens in weiteren, hochdynamischen Szenarien. Parallel erfolgte die durchgängige Digitalisierung der Prüfprozesse: Ein erweitertes AutomationML (AML)-Modell bildet hierbei die semantische Basis (OPC UA), um via MQTT nicht nur spezifische Messwerte, sondern generisch sämtliche anfallenden Qualitäts- und Prozessdaten zentral in einer Cloud-Zeitreibendatenbank für das automatisierte Reporting zu bündeln. Aus diesem holistischen

digitalen Anlagenmodell heraus generiert eine integrierte Pipeline zudem verlässliche Prüfrajektorien für Roboter und Assistenzsysteme.

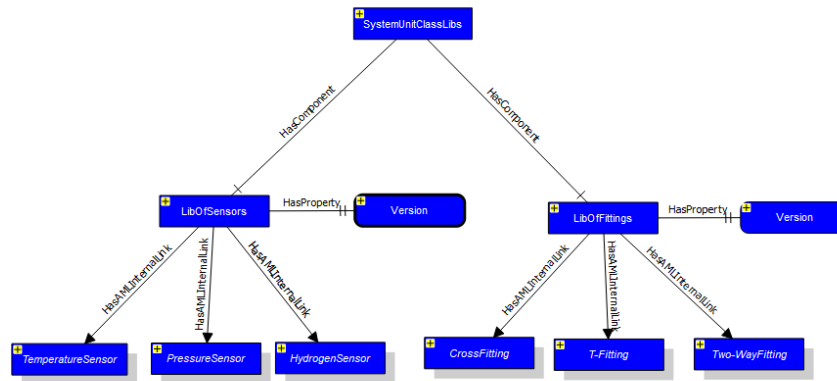


Abbildung 9: Erweitertes AML-Modell des Elektrolyseurs für die Qualitätssicherung

Die Implementierung der Prüfprozesse im Kontext der automatisierten Montage wurde im nächsten Schritt durch praktische Versuche validiert. Die generierten Trajektorien und die abgeleitete Strategie zur vollautomatischen Leckageinspektion wurden erfolgreich in die Steuerung einer mobilen Roboterplattform übertragen und an realen Aufbauten erprobt. Für die manuelle Qualitätssicherung lag der Fokus auf der Entwicklung eines Augmented Reality (AR)-Assistenzsystems für die Steigerung der Zuverlässigkeit in der Leckageinspektion und der automatischen Dokumentation [12]. Zur Optimierung der Nutzerführung wurden spezifische Nutzerstudien durchgeführt, um beispielsweise das ideale visuelle Feedback für Werker beim Einhalten komplexer Trajektorien für den Gassensor zu ermitteln. Um die Praxistauglichkeit sicherzustellen, erfolgte zudem eine tiefgehende Genauigkeitsevaluierung eingesetzter Hardware und Registrierungspipelines mit und ohne physische Marker unter realen Montagebedingungen [15,16]. Darüber hinaus wurde die Verarbeitung von Sensordaten für eine Gasquellenlokalisierung mit Hilfe von Simulationen und Human-In-The-Loop-Tests optimiert und evaluiert.

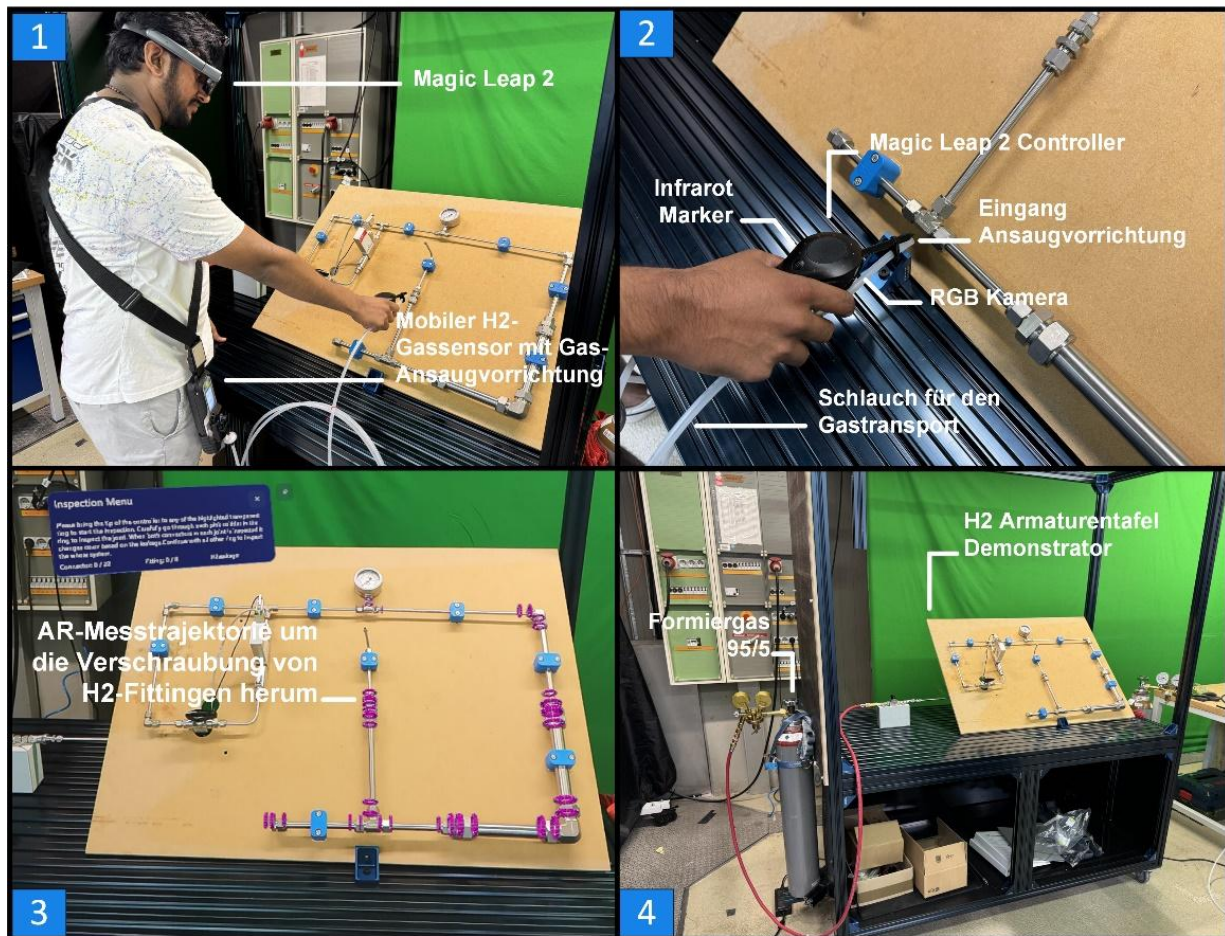


Abbildung 10: Hardware-Setup und Anwendung des AR-Prototyps in der Leckageinspektion

Da die manuelle Klemmringverschraubung als wesentlicher Einflussfaktor für Leckagen identifiziert wurde, erfolgte eine eingehende Untersuchung dieses Prozesses. Ausgehend von realen Fehlerfällen in der Montage wurden verschiedene Datenanalysemethoden implementiert, erprobt und miteinander verglichen. Dabei zeigte sich, dass die Einbindung ergänzender Daten aus dem Werkzeugtracking die Erkennungsleistung unterschiedlicher Fehlerfälle signifikant steigert. Um diese Erkenntnisse praktisch nutzbar zu machen, wurde eine AR-gestützte Datenanalysepipeline entwickelt, die direkt mit einem digitalen Drehmomentschlüssel gekoppelt ist. Dies ermöglicht es, fehlerhafte Verschraubungen bereits während des Montageprozesses in Echtzeit zu erkennen, über das AR-System visuell an den Werker zurückzumelden und unmittelbar in die automatisierte Dokumentation zu integrieren.

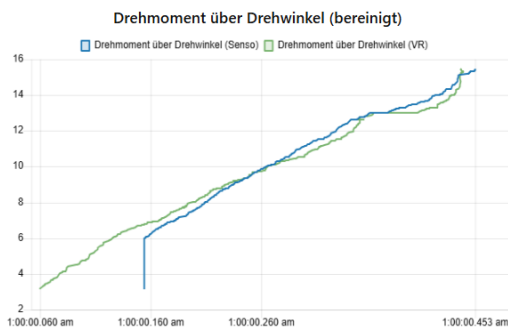


Abbildung 11: Live-Analyse Dashboard zur Überwachung der manuellen Verschraubung (Drehmoment über Drehwinkel)

Zur finalen Erfüllung der Datenintegrationsziele wurden die Schnittstellen zwischen dem Prozessabbild und der Dokumentation implementiert. Dies stellt die Bereitstellung von Informationen aus der Montagefortschrittsüberwachung und der Qualitätssicherung sicher. Die Prüfungen können somit direkt aus dem optimierten AR-System heraus revisionssicher erfasst werden, was die automatische Erstellung von Dokumentationsunterlagen in dem neu entwickelten digitalen Begleitmodell ermöglicht. Abschließend wurden alle definierten Prüfprozesse der Qualitätssicherung am übergeordneten Gesamt-Funktionsdemonstrator zusammengeführt und erfolgreich demonstriert.

## AP 9 - Standardisierung

Im Arbeitspaket 9 wurden die Grundlagen für eine umfassende Standardisierung beim Aufbau großskaliger Elektrolyseure erarbeitet. Das IFPT lieferte hierzu durch die systematische Ableitung und Einbringung technischer Anforderungen an die Steuerungs- und Sensorsysteme sowie an die Qualitätssicherung die notwendige fachliche Zuarbeit. Ein wesentlicher Fokus lag auf der Vernetzung mit relevanten Industrieverbänden (PROSTEP, EEHH), um die Projektergebnisse im Bereich cloudbasierter Produktionsprozesse mit bestehenden Standards abzugleichen. Diese Ergebnisse flossen unmittelbar in die Erstellung von Standardisierungsempfehlungen ein, die eine effiziente und prozesssichere Skalierung der Montageabläufe ermöglichen und die Grundlage für eine industrieübergreifende Harmonisierung der Systemstrukturen bilden.

## AP 11 - Projektmanagement, Integration, Konzeption, Administration

Im Rahmen des Arbeitspaketes 11 wurden die Steuerung und Kontrolle des Projektablaufes sowie die administrative Verwaltung des Teilvorhabens erfolgreich durchgeführt. Ein zentraler Fokus lag dabei auf der wissenschaftlichen Verwertung der Projektergebnisse, die durch die kontinuierliche Integration der gewonnenen Erkenntnisse in die universitäre Lehre am Institut sowie durch Fachpublikationen realisiert wurde. In diesem Kontext initiierte und koordinierte das IFPT insbesondere die gemeinsame Journalveröffentlichung mit dem Gesamtverbund im Journal *Hydrogen* [8], um die interdisziplinären Projektergebnisse gebündelt zu präsentieren. Darüber hinaus wurde die Sichtbarkeit des Projekts durch gezielte Öffentlichkeitsarbeit auf Fachveranstaltungen, wie beispielsweise im Rahmen der Erneuerbaren Energien Hamburg (EEHH), sichergestellt. Durch die Kombination aus administrativer Begleitung, wissenschaftlichem Transfer und öffentlicher Präsentation wurden die managementbezogenen Ziele des Vorhabens vollumfänglich erreicht.

## 2. Darstellung der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die im Rahmen des Vorhabens getätigten Investitionen waren für die technologische Umsetzung der Forschungsziele, insbesondere im Hinblick auf die digitale Ablaufsteuerung und die prozessintegrierte Qualitätssicherung, unerlässlich.

Eine zentrale Position nimmt hierbei die mobile Roboterplattform ein, die als physische Grundlage für den im Antrag vorgesehenen Funktionsdemonstrator fungierte. Diese Plattform wurde intensiv zur Erprobung und Validierung insbesondere der (teil-)automatisierten Leckagedetektion eingesetzt. Damit konnten die theoretischen Konzepte zur Erhöhung der Montagesicherheit sowie zur technologischen Unterstützung bei der Handhabung großskaliger Baugruppen unter realitätsnahen Bedingungen verifiziert werden, was eine wesentliche Voraussetzung für die Überführung der Forschungsergebnisse in die praktische Anwendung darstellte.

Zur Realisierung der im Teilvorhaben adressierten digitalen Montageorchestrierung sowie der aufwendigen Modellierungen war zudem die Beschaffung von zwei spezialisierten Recheneinheiten zwingend notwendig. Aufgrund der extrem langen Rechenzeiten für die komplexen Modelle musste ein paralleles Arbeiten zwingend gewährleistet werden. Während die erste Hardware-Basis primär für die rechenintensive Entwicklung von KI-Modellen zur automatisierten Fortschrittserkennung sowie für den Betrieb des entwickelten Systems zur Montageorchestrierung genutzt wurde, ermöglichte die zweite Recheneinheit zeitgleich die Durchführung komplexer Simulationen von Gasströmungen und die Simulation der mobilen Roboterplattform im Kontext der Leckageinspektion. Diese parallelisierte Infrastruktur stellte somit die notwendigen Kapazitäten bereit, um die flexiblen Abläufe in der Zusammenarbeit von Mensch und Maschine sowie die übergeordnete Orchestrierung der Montageprozesse ohne zeitliche Verzögerungen informationstechnisch abzusichern.

Die Ergänzung der Ausstattung durch spezifische Sensorik, wie Gassensorik und AR-Hardware für Nutzerassistenz, begründet sich direkt aus den hohen Anforderungen an die Sicherheit, Zuverlässigkeit und die lückenlose Dokumentation. Leistungsfähige Gassensorik bildete dabei die technisch zwingende Voraussetzung für die prozessbegleitende Leckage-Detektion sowie die darauf aufbauende -Prävention. Die Motion-Tracking-Systeme waren wiederum für die präzise Fortschrittsüberwachung und die damit verbundene Montageorchestrierung essenziell. Beide Systeme waren unumgänglich, um die im Antrag geforderte Qualitätssicherung im digitalen Zwilling abzubilden und eine sichere, digital unterstützte Skalierung der Montageprozesse zu gewährleisten.

## 3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Die Notwendigkeit der Zuwendung für das Teilvorhaben des IFPT ergab sich aus der strategischen Zielsetzung, die am Institut vorhandenen Kompetenzen in der digitalen Ablaufsteuerung und Automatisierung auf das für das IFPT neue Themenfeld der Wasserstoffgewinnung zu übertragen. Wie in der Vorhabenbeschreibung (TVB) unter Punkt 6 dargelegt, bot das Projekt die Möglichkeit, eine für das Institut komplett neue Branche zu erschließen und damit eine hervorragende wissenschaftliche Anschlussfähigkeit an die nationale Strategie der „Wasserstoffrepublik Deutschland“ zu generieren.

Für ein universitäres Institut wie das IFPT war die Zuwendung zwingend erforderlich, um die notwendigen personellen Kapazitäten für diesen Forschungszweig aufzubauen. Erst die Förderung ermöglichte die zeitgleiche, befristete Anstellung von zwei wissenschaftlichen Mitarbeitern, die sich vollständig auf die Erforschung der digital unterstützten Orchestrierung und der prozessintegrierten Qualitätssicherung konzentrieren konnten. Ohne diese Mittel wäre eine Bearbeitung des Vorhabens in der erforderlichen wissenschaftlichen Tiefe aus regulären Haushaltsmitteln nicht darstellbar gewesen, insbesondere die experimentelle Wissensgenerierung, Integration komplexer Datenstrukturen und Analysen und die Entwicklung der KI-basierten Fortschrittserkennung.

Die Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten spiegelt sich im Ausbau der Reputation und der Wettbewerbsfähigkeit des Instituts wider. Das Projekt HyPLANT100 hat den Grundstein eines neuen Forschungsfelds am Institut begründet, welches nun durch weitere nachfolgende Projekte weiter ausgebaut wird. Durch die Zuwendung wurde das IFPT in die Lage versetzt, die Verbindung zur Industrie im Bereich der Wasserstofftechnologien massiv auszubauen und sich im Wettlauf um qualifizierte Talente als attraktiver Forschungsstandort für wissenschaftliche Mitarbeiter und studentische Abschlussarbeiten zu positionieren.

Die eingesetzten Mittel für die mobile Roboterplattform, die spezifische Gassensorik, die AR-Hardware sowie die zwei spezialisierten Recheneinheiten waren für die Umsetzung des im Antrag vorgesehenen Funktionsdemonstrators unumgänglich. Diese Investitionen stehen in einem angemessenen Verhältnis zu den Ergebnissen, da sie die im TVB adressierten komplexen technologischen und methodischen Herausforderungen bei der Skalierung der Montageprozesse ganzheitlich adressiert und erfolgreich validiert haben. Damit wurde die im Antrag beschriebene Lücke zwischen der Produktionsform der manueller Baustellenmontage und automatisierter Vormontage für großskalige Elektrolyseure erfolgreich geschlossen und eine belastbare Basis für zukünftige Drittmittelvorhaben in diesem Sektor geschaffen.

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

Die im Rahmen des Vorhabens erzielten Ergebnisse finden am IFPT sowohl in der wissenschaftlichen Forschung als auch in der akademischen Ausbildung eine unmittelbare und nachhaltige Verwertung. Ein wesentlicher Aspekt der Ergebnissicherung ist dabei die Qualifizierung des wissenschaftlichen Personals auf Promotionsebene. Zwei Dissertationen basieren unmittelbar auf den im Projekt erarbeiteten Inhalten und fokussieren die Bereiche der automatisierten Fortschrittserkennung sowie der Nutzerassistenz für die Leckagedetektion, wobei der Abschluss beider Vorhaben für den Zeitraum 2026 bis 2027 geplant ist. Das hierbei aufgebaute Expertenwissen bildet den Kern für die weitere fachliche Profilbildung des Instituts.

Parallel dazu sind die Ergebnisse fester Bestandteil der akademischen Lehre an der Technischen Universität Hamburg (TUHH). Ein direkter Methodentransfer erfolgte durch die Integration der Erkenntnisse in die Vorlesung „Robotik: Modellierung und Regelung“ (während oder direkt nach Projektende). Darüber hinaus stellen studentische Abschluss- und Projektarbeiten eine zentrale Säule des Wissenstransfers dar. Im Projektverlauf wurden zahlreiche Arbeiten betreut, die das gesamte technologische Spektrum von robotischen Fragestellungen und der Leckageinspektion bis hin zur Montageorchestrierung und

Fortschrittserkennung abdecken, wodurch ein nachhaltiger Beitrag zur Ausbildung hochqualifizierter Fachkräfte für die Industrie geleistet wird.

Die durch HyPLANT100 etablierte Expertise im Bereich der Wasserstofftechnologien ermöglichte dem Institut zudem einen erfolgreichen Kompetenztransfer, insbesondere in die Luftfahrtforschung. Die methodischen Vorarbeiten dienen als Grundlage für eine Reihe bereits begonnener Nachfolgeprojekte wie H<sub>2</sub>-Endo, Hydro-Bunny, iPrefer oder KLioWalH<sub>2</sub>, in denen die wasserstoffspezifischen Anforderungen weiter vertieft werden. Im laufenden Projekt LiveScan konzentriert sich das IFPT dabei spezifisch auf die Weiterentwicklung und Skalierung der Algorithmen zur Fortschrittserkennung und Montageorchestrierung. Diese Projektlandschaft belegt, dass das Institut durch die Zuwendung eine belastbare Forschungsinfrastruktur für die kommenden fünf bis zehn Jahre etabliert hat.

Die Verwertung der Ergebnisse wird über das Projektende hinaus durch eine kontinuierliche Dissemination in der Fachwelt sichergestellt. Dies umfasst die bereits aktuell laufende Publikation auf den Projektergebnissen aufbauenden wissenschaftlicher Beiträge in referierten Fachorganen sowie die Präsentation der technologischen Meilensteine auf einschlägigen Fachveranstaltungen und in digitalen Expertennetzwerken. Durch diese Maßnahmen werden die Projektergebnisse nachhaltig in der nationalen Forschungslandschaft sichtbar gehalten und die wissenschaftliche Reputation des Instituts gestärkt.

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

Während der Laufzeit des Vorhabens wurden keine externen Forschungsergebnisse oder technologischen Entwicklungen bekannt, die eine Anpassung der Projektziele oder eine Übernahme in das Teilvorhaben erforderlich gemacht hätten. Gleichwohl basierten sämtliche Eigenentwicklungen auf einer kontinuierlichen Berücksichtigung des aktuellen Stands der Forschung und Wissenschaft, was durch die begleitenden Fachpublikationen des Instituts dokumentiert ist.

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

[ ]	Datum	Art der Veröffentlichung	Titel, Quelle/Zitat (Journal, Konferenz)	Autoren	Link
1	2022	Veröffentlichung	Grünen Wasserstoff schnell produzieren, INP	Christian Masuhr, Lukas Büsch	<a href="#">Link</a>
2	2023	Veröffentlichung + Vortrag	Development of a multi-sensor concept for progress detection in the site assembly of electrolysis units, Procedia CIRP	Lukas Büsch, Julian Koch, Thorsten Schüppstuhl	<a href="#">Link</a>
3	2023	Veröffentlichung + Vortrag	Leakage Inspection for the Scale-Up of Hydrogen Electrolyzers: A	Christian Masuhr, Lukas Büsch, Thorsten Schüppstuhl	<a href="#">Link</a>

			Case Study and Comparative Analysis of Technologies		
4	2023	Vortrag	H2 Giga: HyPlant 100 - Industrialisierung der Montage bis zum Baufeld für die Gigawattelektrolyse	Lukas Büsch, Kay Haalck	-
5	2023	Veröffentlichung	Towards Recognition of Human Actions in Collaborative Tasks with Robots: Extending Action Recognition with Tool Recognition Methods, Sensors	Lukas Büsch, Julian Koch, Daniel Schoepflin, Michelle Schulze, Thorsten Schüppstuhl	<a href="#">Link</a>
6	2023	Veröffentlichung (Poster)	HyPLANT100 – Automatisierter Aufbau großskaliger Elektrolyseure	D. Syniawa, L. Christ, M. Jakschik, J. Schachtsiek, L. Büsch, C. Masuhr, P. Adler, T. Schüppstuhl, B. Kuhlenkötter	<a href="#">Link</a>
7	2023	Vortrag	Automatisierungsoptionen im Montageprozess einer Elektrolyseurfertigung	Lukas Büsch, Benedikt Ebert	-
8	2024	Veröffentlichung	HyPLANT100: Industrialization from Assembly to the Construction Site for Gigawatt Electrolysis, Hydrogen	L. Büsch, M. Jakschik, D. Syniawa, C. Masuhr, L. Christ et al.	<a href="#">Link</a>
9	2024	Veröffentlichung (Poster)	HyPLANT100-Modularisierung und Automatisierung für die Montage großskaliger Wasserelektrolyseure	C. Masuhr, L. Christ, L. Büsch, D. Syniawa, M. Jakschik, P. Adler, B. Kuhlenkötter, T. Schüppstuhl	<a href="#">Link</a>
10	2024	Veröffentlichung + Vortrag	HARDAT: Human Action Recognition Dataset for Manual Assembly Tasks	Lukas Büsch, Mert Palazoğlu, Thorsten Schüppstuhl	<a href="#">Link</a>
11	2024	Veröffentlichung + Vortrag	Mobile Leckageprüfung und -lokalisierung für H <sub>2</sub> -Antriebskonzepte in der Luftfahrt	C. Masuhr, T. Schüppstuhl	<a href="#">Link</a>
12	2024	Veröffentlichung + Vortrag	Augmented Reality Authoring for Efficient Inspections in Green Aviation: Evaluating Accuracy and Usability	Christian Masuhr, Julian Koch, Thorsten Schüppstuhl	<a href="#">Link</a>
13	2025	Veröffentlichung (Poster)	HyPLANT100-Automatisierung der Produktion von Elektrolyseuren größer ein Gigawatt	S. Krieger, L. Christ, D. Syniawa, M. Jakschik, C. Masuhr, L. Büsch, P. Adler, T. Schüppstuhl, B. Kuhlenkötter	<a href="#">Link</a>
14	2025	Veröffentlichung + Vortrag	Evaluating Magic Leap 2 Controller Tracking for Sensor Tool Guidance in AR-Based Industrial Inspections	Christian Masuhr, Julian Koch, Thorsten Schüppstuhl	<a href="#">Link</a>
15	2025	Veröffentlichung	Evaluating FoundationPose Object Registration Accuracy for AR-Guided Industrial Inspection	Christian Masuhr, Julian Koch, Tim Oels, Thorsten Schüppstuhl	<a href="#">Link</a>
16	2021–2025	Social Media (LinkedIn)	Fachbeiträge und Projektmeilensteine (ca. 15 Beiträge)	IFPT TUHH	<a href="#">Link</a>