

Individueller Schlussbericht – Fraunhofer CML

Pin-Handling-mR

Automatisierung des Pin-Handling bei Containertragwagen durch die mobile Robotik

FKZ: 19H22006B

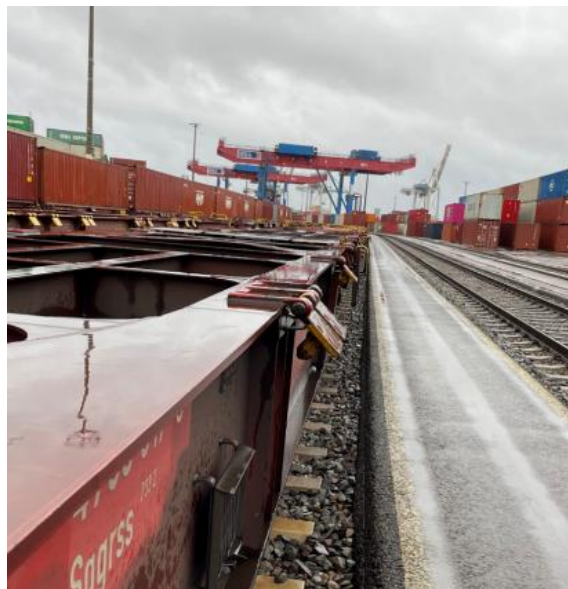
Verbundkoordinator

HHLA Hamburger Hafen und Logistik AG

(in Kooperation mit den HHLA Tochtergesellschaften **HHLA Sky, Metrans, CTT** und **HPC**)

Projektpartner

Fraunhofer-Center für Maritime Dienstleistungen und Services CML



Förderung durch das
Bundesministerium für Digitales und Verkehr
im Rahmen des Förderprogramms IHATEC II

Projektlaufzeit: 10/2022 – 03/2025

Inhaltsverzeichnis

1	Projektbeschreibung	2
1.1	Aufgabenstellung.....	2
1.2	Voraussetzungen der Projektdurchführung.....	2
1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens.....	2
1.4	Stand der Wissenschaft und Technik	3
1.5	Kooperationen	4
2	Projektergebnisse.....	5
2.1	Erzielte Ergebnisse und Verwendung der Zuwendung.....	6
2.1.1	AP 100	7
2.1.2	AP 200	7
2.1.3	AP 300	8
2.1.4	AP 400	10
2.1.5	AP 500	11
2.1.6	AP 600	13
2.2	Zahlenmäßiger Nachweis	14
2.3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	15
2.4	Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse	16
2.5	Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	17
2.6	Veröffentlichungen.....	17
2.7	Quantitative und qualitative Effekte	19

1 Projektbeschreibung

1.1 Aufgabenstellung

Die manuelle Bearbeitung des Pin-Handlings an Containertragwagen ist gefahrgeneigt, kostenintensiv und impliziert Verzögerungen im Abfertigungsprozess. Durch die Entwicklung eines automatisierten Pin-Handlings für Containertragwagen mit Hilfe einer innovativen mobilen Robotik können die Arbeitssicherheit und die Arbeitsplätze der Kollegen verbessert, die Gesamttransportkosten im Seehafenhinterlandverkehr reduziert und die Terminalprozesse optimiert werden. Aufgabe des Forschungsprojekts Pin-Handling-mR war die Entwicklung eines Robotiksystems zur Übernahme dieser Prozesse.

1.2 Voraussetzungen der Projektdurchführung

Die aktuellen Gegebenheiten sehen ein manuelles Pin-Handling vor. Dafür erhält ein Checker einen Ausdruck des Beladesolls und verändert, wenn nötig die Pin-Positionen, während er mit einem Checkermobil durch die Gleisgasse fährt oder diese zu Fuß abläuft. Dieser Arbeitsbereich gilt als gefahrgeneigt und ist zudem kostenintensiv.

Dieser manuelle Bearbeitungsschritt bietet großes Automatisierungspotenzial und bildet die Grundlage für das Forschungsprojekt. Ziel ist die Entwicklung eines autonomen Robotik-Systems, das den manuellen Arbeitsschritt automatisiert. Bei einer Umsetzung dieses Robotik-Systems würden die Innovationen von Hafentechnologien im Bereich von autonomen Systemen und automatisierter Technologien sowie eine stärkere Nutzung von IT in deutschen Häfen vorangetrieben und die Arbeitssicherheit durch den dann nicht mehr notwendigen Aufenthalt im Verladebereich erhöhen. Bei einer erfolgreichen Projektdurchführung und einer nachfolgenden Umsetzung könnten durch die einfache Übertragbarkeit auf eine Vielzahl von See- und Binnenhafenstandorten im Seehafenhinterlandverkehr zusätzlich signifikante Effizienzsteigerungen erzielt werden. Dies hätte zur Folge, dass der Seehafenhinterlandverkehr in Deutschland per Bahn gegenüber dem LKW zunehmen und der damit einhergehende reduzierte CO₂-Ausstoß zur verbesserten Nachhaltigkeit beitragen würde.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Für das Forschungsvorhaben Pin-Handling-mR wurden insgesamt 14 Arbeitspakete (AP) für die inhaltliche Arbeit sowie für Projektmanagement und -koordination definiert. Die einzelnen Arbeitspakete wurden im Vorfeld entsprechend der IHATEC Vorgaben inhaltlich und ressourcenbezogen beschrieben und es wurde dargestellt, welcher Partner die Federführung in den einzelnen Arbeitspaketen übernimmt. Die Beschreibung der Arbeitspakete sowie die jeweiligen Ziele und Ergebnisse sind in Kapitel 2.1 aufgeführt.

Zwecks Strukturierung und Kontrolle dieses Projektes wurden Meilensteine, die signifikante Ereignisse markieren, definiert. Die Meilensteine sind nachfolgend genannt.

- MS1: Projektbeginn, Etablierung der Zusammenarbeit
- MS2: Start der IST-Analyse
- MS3: Start der Konzepterstellung
- MS4: Ende der IST-Analyse
- MS5: Start der Funktionsentwicklung
- MS6: Ende der Konzepterstellung
- MS7: Start des Demonstratoraufbau & Funktionstests
- MS8: Ende der Funktionsentwicklung
- MS9: Start der Pilotierung im Feld
- MS10: Ende des Demonstratoraufbau & Funktionstests
- MS11: Ende der Pilotierung im Feld
- MS12: Projektende, Ergebnispräsentation und Projektabschluss

1.4 Stand der Wissenschaft und Technik

Die Automatisierung des Materialflusses auf Containerterminals ist ein bedeutsames Themengebiet. Die Treiber dafür sind Erhöhung der Arbeits- und Prozesssicherheit, die Möglichkeit einer besseren Allokation qualifizierter Mitarbeiter sowie die Reduzierung der Betriebskosten. In der betrieblichen Praxis werden neben rein manuellen Terminals semiautomatisierte und vollautomatisierte Containerterminals unterschieden. Bei den semiautomatisierten Terminals ist das Handling der Container durch automatisierte Systeme realisiert. Vollautomatisierte Containerterminals setzen darüber hinaus automatisierte Horizontaltransportmittel ein. Doch selbst auf vollautomatisierten Containerterminals gibt es materialflussbezogene Tätigkeiten, die manuell realisiert werden müssen (z. B. die Handhabung der Twistlocks auf der Wassenseite oder das Pin-Handling im Bahnbereich). Besonders im Bereich des Pin-Handling stellt diese manuelle Tätigkeit eine der letzten Hürden für vollautomatische Be- und Entladeprozesse im Bahnbereich dar. Das Pin-Handling-mR Projekt ist bis dato der einzige (öffentliche) Lösungsansatz für die Automatisierung des Pin-Handlings.

Moderne Robotiksysteme greifen zum Zwecke der Lokalisierung und Navigation meist auf klassische SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) -basierte Lösungen zurück. Hierbei werden Daten von Sensoren wie LiDAR (Light Detection and Ranging), und IMU (Inertial Measurement Unit) kombiniert. Fortschrittlichere Ansätze bieten zudem die Möglichkeit die vorhandenen Sensordaten mit Kamerabildern zu erweitern und so einen „Visual SLAM“ zu realisieren. Alternativ bieten hochwertige RTK-gestützte GNSS-Empfänger eine qualitative Positionsbestimmung im Zentimeterbereich, die explizit für die Navigation in Außenbereichen adäquat ist. Bei diesem Ansatz stützt sich das System nicht auf vorhandene Karten der Umgebung oder spezifische „Landmarks“. Dies ist insbesondere bei besonders dynamischen Umgebungen, wie einem Hafenterminal, von Vorteil. Hinsichtlich Themen wie Objekterkennung und Kollisionsvermeidung haben sich visuelle Sensoren wie LiDAR und Stereokameras zur Erkennung durchgesetzt. Parallel zu den weit verbreiteten, klassischen CV (Computer Vision) Ansätzen, die auf die Erkennung bestimmter Farben, Geometrien oder vergleichbarer Eigenschaften setzt, haben performante Deep Learning Modelle in den vergangenen Jahren große Verbreitung und Adaption gefunden. Dies lässt sich auch auf die wachsende Rechenleistung zurückführen mit denen moderne Roboter heutzutage ausgestattet sind. Dieser Ansatz erlaubt es, auch aus 2D Bildern relevante Daten für die Objekterkennung zu

gewinnen und bietet vor allem in Hinblick auf Klassifikation weitreichende Anwendungsoptionen. Besonders bei sicherheitsrelevanten Aspekten, z.B. der Detektion von Menschen, ist dies von hoher Signifikanz. Das ROS-Framework bietet dabei eine etablierte Grundlage für die Entwicklung von modernen, robotischen Systemen.

Robotische Manipulation findet in definierten und begrenzten Bereichen seit vielen Jahrzehnten Anwendung, jedoch meist im Kontext der industriellen Fertigung. Hierbei kommen leistungsfähige Industrieroboter zum Einsatz, mit Payloads von mehreren hundert bis tausend Kilogramm. Aufgrund der großen Kräfte, die bei diesen Systemen wirken, können sie ausschließlich in Bereichen eingesetzt werden, in denen sich keine Menschen befinden. Dies wird zum Beispiel durch Einhausungen sichergestellt. Dagegen ist das Feld der sogenannten kollaborativen Robotik im Bereich der Manipulation vergleichsweise jung. Kollaborative Roboter, sogenannte „Cobots“, mit wenigen Kilogramm Payload sind für den Bereich der Human Robot Interaction geeignet, sind dabei jedoch auf leichte Manipulationsaufgaben beschränkt und werden primär für Palettierung oder Maschinenbestückung eingesetzt. Die Auswahl an Hardware in diesem Bereich ist stark beschränkt - Cobots mit mehr als 12 kg Payload, wie sie es für den Anwendungsfall des Pin-Handlings benötigen werden, waren erst wenige Monate nach Projektbeginn auf dem Markt verfügbar.

1.5 Kooperationen

Sämtliche Software-Entwicklungsarbeiten wurden von den beteiligten Projektpartnern Fraunhofer CML und der HHLA unter maßgeblicher Beteiligung des HHLA-Tochterunternehmens HHLA Sky realisiert. Bezüglich der Detailplanung der mobilen Robotik Plattform stimmte sich das Fraunhofer CML nach Auftragsvergabe eng mit dem Hersteller „Innok Robotics GmbH“ ab, um sicherzustellen, dass die entsprechenden Anforderungsspezifikationen vollumfänglich erfüllt werden. Den Rahmen für die Praxiserprobung stellte das KV-Terminal des HHLA Container Terminals Tollerort.

Weiterhin erfolgten im Rahmen der IST- und Anforderungsanalyse Begehungen des Bahnumschlagbereichs bei zwei der assoziierten Projektpartner („Hafenbetriebsgesellschaft Braunschweig mbH“ und „Kombi-Terminal Ludwigshafen KTL“). Diese dienten der Aufnahme weiterer Anforderungen an das Gesamtsystem, spezifisch in Bezug auf die zu erwartenden Pin-Typen sowie weiteren, potenziellen Umgebungsfaktoren (Untergrundbeschaffenheit, Abmessungen, etc.). Darüber hinaus erfolgten Gespräche mit Vertretern der DB-Cargo, ebenfalls im Rahmen der IST-Analyse (AP200), mit dem Ziel ein besseres Verständnis der Pin-Standardisierung aufzubauen und häufig genutzte Typen zu identifizieren.

2 Projektergebnisse

Für das Forschungsvorhaben Pin-Handling-mR wurden insgesamt 14 Arbeitspakete (AP) für die inhaltliche Arbeit sowie für Projektmanagement und -koordination definiert. Auf den nachfolgenden Seiten sind die Ergebnisse der übergeordneten AP beschrieben.

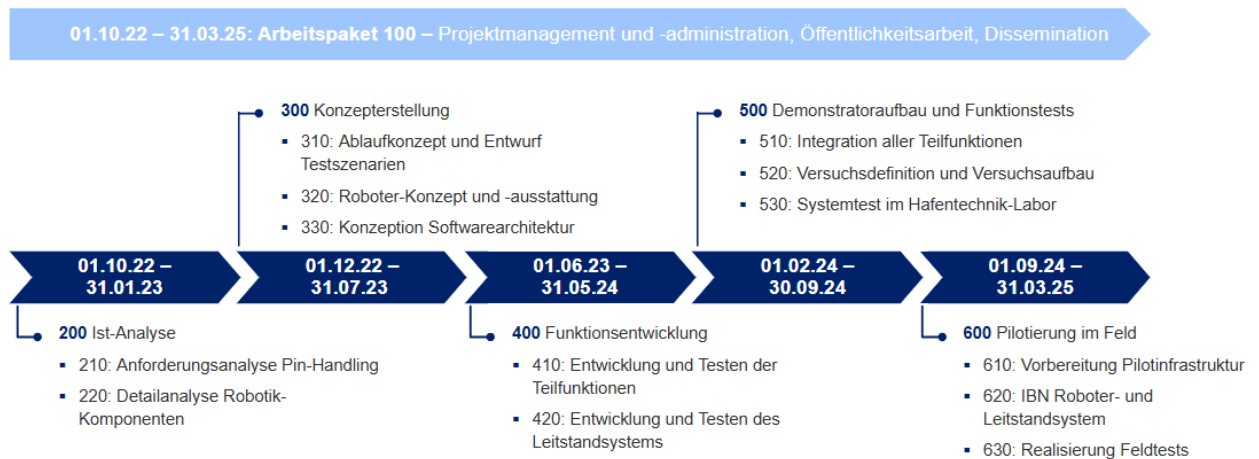


Abbildung 1: Übersicht Arbeitspakete

Die im Zuge des Projektantragstellung aufgestellte Übersicht der Arbeitspakete wurde in der Praxis bedarfsgerecht angepasst. Durch zeitliche Engpässe (u.a. verspätete Roboter Bestellung / Lieferung / Hardwaredefekt) wurden AP 500 und 600 weniger umfangreich bearbeitet als zu Projektbeginn geplant.

2.1 Erzielte Ergebnisse und Verwendung der Zuwendung

Bezugnehmend auf die im Projektantrag festgehaltenen Indikatoren der Zielerreichung erfolgt in der nachstehenden Tabelle die Überprüfung der Zielerreichung.

Kriterium	Indikator	Aktueller Stand der Technik	Zielsetzung vor Projektbeginn	Angestrebter Zeitpunkt der Zielerreichung	Überprüfung Zielerreichung
Erfolgreiche Vorbereitung der Pins mit Hilfe des Roboters	%-Satz der Pins	0 %	90% aller zu bearbeitenden Pins per Roboter	Nach Abschluss der Testphase im KV Terminal, Projekt-Monat 30	Die autonome Pin-Manipulation aus einer leitstandseitig generierten Mission ist zum Projektmonat 30 erfolgreich umgesetzt und getestet worden. Dabei werden ca. 75-80 % aller Pins erfolgreich manipuliert. Zur Erzielung eines höheren Prozentwertes besitzt die Gesamtanwendung noch nicht die erforderliche Robustheit.
Erhöhung der durchschnittlichen Anzahl von umzuschlagenden TEU auf dem CTA-Terminal*	Anzahl der umgeschlagenen TEU pro Werktag	2.285 TEU	2.856 TEU	Sechs Jahre nach Umsetzung der Robotiksysteme auf dem CTA-KV-Terminal	Die zum Projektende bestehende Lösung besitzt noch nicht die nötige Reife zur produktiven Einführung. Weitere Entwicklungs-, Test- und Integrationsaktivitäten sind erforderlich. Die Zielsetzungen erscheinen unter der Voraussetzung vollständig verfügbarer zugbezogener Daten sowie einer robusten und performanten Funktion des Leitstandes und der mobilen Roboter erreichbar.
Reduzierung des CO2-Ausstoß durch die Verlagerung „von der Straße auf die Schiene“	Reduzierter Ausstoß von CO2 pro Jahr durch den Hinterlandtransport per Bahn statt per LKW (0,094 kg pro tkm weniger)	0 t	60.400 t <u>weniger</u>	Sechs Jahre nach Umsetzung der Robotiksysteme	
Neue hochwertige Arbeitsplätze pro Terminal durch die Automatisierung / Robotik	Anzahl zusätzlicher hochwertiger Arbeitsplätze pro KV-Terminal	0 Arbeitsplätze	1-2 Arbeitsplätze	Ein Jahr nach Umsetzung der Robotiksysteme auf den KV-Terminals	

Tabella 1 Überprüfung der Zielerreichung

*) Die Projektdurchführung erfolgte aus operativen Gründen auf dem Container Terminal Tollerort. Jedoch gehen wir davon aus, dass unter den genannten Bedingungen dieses Ziel auch für CTA Container Terminal Altenwerder erreicht werden kann.

2.1.1 AP 100

Das Arbeitspaket 100 umfasst das Projektmanagement, die Administration, die Öffentlichkeitsarbeit und die Dissemination.

Ziel dieses Arbeitspakets war die erfolgreiche interne und externe Koordination und Kommunikation, u.a., um im beantragten Budget und Zeitrahmen die Projektziele zu erreichen. Dieses Arbeitspaket begleitete das Projekt über die gesamte Dauer von Projektbeginn bis zum Projektabschluss.

Während des gesamten Projektes fanden regelmäßige, teils wöchentliche Projektmeetings zum Austausch der Teilergebnisse mit den Projektbeteiligten statt. In einem drei-monatigen Rhythmus wurden Projektregelmeetings durchgeführt, zu denen alle Projektteilnehmer und Projektpartner eingeladen wurden. Im Rahmen von Konferenzen und Fachbeiträgen wurden verschiedene Veröffentlichungen getätigt, die in Kapitel 2.6 detaillierter erläutert werden. Des Weiteren wurde im Rahmen des Arbeitspakets 100 die Koordination und Organisation sämtlicher Schritte (z.B. Durchführung von Testkampagnen am Container Terminal Tollerort (CTT)) durchgeführt. Auch die Verwaltung und Übersicht der finanziellen Mittel wurden hier verfolgt.

2.1.2 AP 200

Das Arbeitspaket 200 umfasst die IST-Analyse, unterteilt in die Anforderungsanalyse und die Detailanalyse der Robotik-Komponenten.

Ziele des AP

- Zusammenstellung der operativen und technischen Anforderungen an das mobile Robotik-System und an das dazugehörige Leitstandsystem
- Erstellung einer Liste mit potenziell geeigneten Hardware-Komponenten und Akquise von relevanten technischen Details je gelisteter Hardware-Komponente (technisches Datenblatt, Bedienungsanleitung).
- Evaluierung der Notwendigkeit von Software- und Informationsschnittstellen zwischen HHLA-Sky Leitstand, dem Roboter und dem Terminallogistiksystem

Zur Anforderungsanalyse des Pin-Handlings wurden die relevanten Prozesse auf den HHLA-Terminals Container Terminal Altenwerder (CTA) und CTT analysiert. Zusätzlich wurden Besichtigungen und Experteninterviews auf zwei Terminals der assoziierten Projektpartner realisiert. Festzuhalten ist, dass die Prozesse der Bahnabfertigung im Wesentlichen einheitlich sind. Die für das Projekt besonders relevanten Unterschiede betreffen die Bodenbeschaffenheit der Gassen zwischen den Zügen und die Übergänge zwischen den betreffenden Gassen. Eine wichtige Erkenntnis betraf die Varianz der Tragwagen und Pins. Da auf Inland-KV-Terminals neben Containern auch Trailer umgeschlagen werden, ist die Vielfalt eingesetzter Tragwagen (und somit auch Pins) größer als in Seehäfen, wo nahezu ausschließlich Container umgeschlagen werden. So war einer der auf Inland-KV-Terminals gesichteten Pin-Typen wesentlich höher als im Durchschnitt auf dem Tragwagen positioniert, ein anderer Pin-Typ verfügte über einen Haken, der beim Stecken entriegelt werden muss. Die Manipulation der genannten Pins mit nur einem Roboterarm erscheint nicht realisierbar, da die Anforderungen zur eigentlichen Handhabung sehr typspezifisch bei gleichzeitig hoher Vielfalt der relevanten Typen sind. Eine detaillierte Analyse der in Seehafenterminals eingesetzten Tragwagen und Pin-Typen (Recherche, Vor-Ort-Begehungen, Gespräche mit Experten, Austausch mit einem Vertreter der DB Cargo) führte zu der Erkenntnis, dass die für die Fixierungsfunktion entscheidende „Oberseite“ der Pins eine einheitliche Geometrie aufweist. Die „Unterseite“ der Pins ist bei den gesichteten Pin-Typen unterschiedlich. Als Ergebnis wurden drei Pin-

Typen identifiziert, die nach Einschätzung des Projektteams ca. 95% der vorkommenden Pins abdecken und somit für die Pins auf KV-Bahnhöfen der Seehafenterminals repräsentativ sind.

1. Standard-Pins



2. Pins „mit Nase“



3. Pins „mit Aussparung“



Die Analyse der auf dem Markt vorkommenden Hardwarekomponenten für das zu entwickelnde Robotik-System wurde für die Schlüsselkomponenten Roboterplattform, Roboterarm, Endeffektor, und Sensorik umgesetzt.

Durch die Betrachtung vorhandener Kommunikationsschnittstellen und vorhandener Leitstandssteuerungen haben sich Anforderungen sowohl an die Entwicklung des Leitstandsystems als auch an den Roboter ergeben. Als Ergebnis stand hier eine Anforderungsliste von HHLA Sky, die Fraunhofer CML in der Hard- und Softwareentwicklung des Roboters beachtet hat. Darüber hinaus wurde eine Schnittstellenbeschreibung angefertigt, die von Sky an CML übergeben wurde, welche die grundlegende Kommunikation des Roboters mit dem Leitstand definiert.

2.1.3 AP 300

Das Arbeitspaket 300 umfasst die Konzepterstellung, unterteilt in das Ablaufkonzept und den Entwurf von Testszenarien, das Roboterkonzept inklusive Ausstattung und die Konzeption der Softwarearchitektur.

Ziele des AP

- Erstellung des SOLL-Prozesses für das autonome Pin-Handling für das Testfeld
- Identifizierung von zusätzlichen Anforderungen auf den KV-Bahnhöfen assoziierter Projektpartner
- Aufstellung von Kennzahlen zur Beurteilung des autonomen Pin-Handlings
- Erarbeitung eines Katalogs von Testfällen zur späteren Beurteilung
- Definition des Ablaufprozesses im Leitstand sowie für den Verbund von Roboter und Leitstand
- Sicherstellung des nötigen Echtzeitdatentransfers zwischen dem Leitstand und dem mobilen Robotik-System
- Spezifikation, Auswahl und Beschaffung der Hardware-Komponenten für das mobile Robotik-System
- Entwurf eines Demonstrator-Konzeptes für den Systemtest im Labor
- Entwurf eines Terminalinfrastruktur-Konzeptes für die Pilotierung im Feld

Ziel war eine Spezifikation der Softwarearchitektur, sowohl auf dem Roboter als auch leitstandseitig. Dabei sollten sowohl Betriebssysteme, Programmiersprachen und Frameworks, als auch die Verteilung der Funktionalität auf die Roboter- und die Leitstandskomponenten spezifiziert

werden. Weiterhin sollte spezifiziert werden, welche Daten in welchem Format ausgetauscht werden und in welcher Form Befehle weitergegeben und empfangen werden sollen. Ein Kommunikationsprotokoll zwischen Roboter und Leitstand soll vorliegen.

Nach der Aufnahme der IST-Prozesse des Pin-Handlings wurden im Rahmen von Workshops die SOLL-Prozesse eines automatisierten Pin-Handlings definiert. Die Teilprozesse Missionsvorbereitung, Missionsdurchführung und Monitoring wurden im Detail abgebildet. Dabei wurden auch sicherheitsrelevanten Teilprozesse (Kollisionsvermeidung und geplante Abschaltung des Roboterarms) aufgestellt.

Die definierten SOLL-Prozesse des automatisierten Pin-Handlings sind u. a. Vertretern vom Amt für Arbeitsschutz und von der Berufsgenossenschaft zur Einholung von Feedback vorgestellt worden. Weiterhin wurde in diesem Arbeitspaket das finale Roboter-Konzept aufgestellt. Die oben genannten Hardwarekomponenten wurden spezifiziert, ausgeschrieben und beschafft. Zusammenfassend sieht das Roboterkonzept eine gummibereifte Roboterplattform sowie einen kollaborativen Roboterarm (Cobot) mit einem Magnetgreifer vor. Zur Pin- und Umfelderkennung wurden zwei Tiefenkameras und ein 32-Lagen LiDAR-Sensor vorgesehen. Ein GNSS-System mit Echtzeitkinematik sowie eine IMU runden das Sensorkpaket zur Lokalisierung des Roboters ab. Zur Kommunikation des Roboters mit dem Leitstandsystem wurde ein LTE-WLAN-Router vorgesehen. Bei der finalen Spezifikation der Roboterplattform und des Roboterarms wurde die Erkenntnis gewonnen, dass es auf dem Markt weniger Anbieter mit Produkten, welche den ermittelten Anforderungen entsprechen, gibt, als zum Zeitpunkt der Antragstellung angenommen. Die wesentlichen Anforderungen, welche die Anzahl der in Frage kommenden Hardwarekomponenten limitierten, sind wie folgt:

Dimensionen der Roboterplattform: Die Plattform sollte über eine hinreichende Traglast zur Aufnahme der übrigen Hardware bei einer maximalen Breite von 80 cm betragen. Die Stabilität des Gesamtsystems im fahrenden Betrieb sowie während der Manipulation muss sichergestellt sein.

Traglast, Reichweite und Typ des Roboterarms: Aufgrund der Sicherheitsanforderungen kam nur ein kollaborativer Roboterarm, welcher die Zusammenarbeit mit Menschen im gleichen Arbeitsumfeld ermöglicht, infrage. Gleichzeitig sollte die Traglast des Roboterarms 20 kg oder mehr betragen, um mit einem ausreichenden Puffer die im Durchschnitt 100 N aufzubringende Kraft zur Pin-Manipulation zu erbringen. Zum sicheren Erreichen der Pins war außerdem eine Mindestreichweite von 150 cm gefordert.

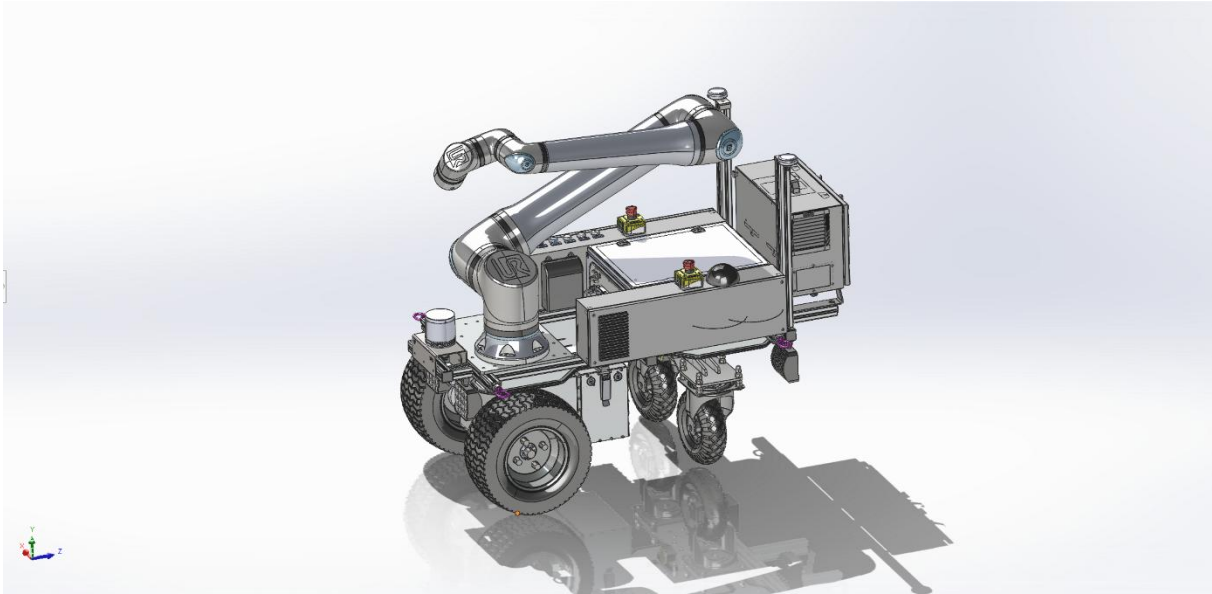


Abbildung 2: CAD-Modell des ersten Pin-Handling Roboters

Im weiteren Verlauf des Arbeitspakets wurde zudem die vollständige Softwarearchitektur definiert. Besonderes Augenmerk galt hier den spezifischen Anforderungen, die aus dem angestrebten Use-Case sowie der Arbeitsumgebung des Roboters hervorgehen, wie zum Beispiel sicherheitsrelevante Funktionen und Redundanzen. Weiterhin wurden alle benötigten Schnittstellen, sowohl zwischen internen Subfunktionen als auch zwischen Roboter und Leitstand festgelegt und zwischen den Projektpartnern kommuniziert.

2.1.4 AP 400

Das Arbeitspaket 400 umfasst die Funktionsentwicklung, untergliedert in die Entwicklung und das Testen der Teilfunktionen und die Entwicklung und das Testen des Leitstandsystems.

Ziele des AP

- Identifizierung von frei verfügbarer Softwarebibliotheken (ROS-Pakete) zur Realisierung von beschriebenen Funktionen
- Neu- und Weiterentwicklung von Software für die beschriebenen Funktionen
- Definition von Testprogrammen (Modultests)
- Realisierung von Funktionstests für die entwickelten oder modifizierten Softwarepakete
- Entwickeln und Testen des Graphical User Interfaces des Leitstandes
- Testen der Kommunikation zwischen Roboter und Leitstand
- Testen der Missionserstellung

Parallel zur Konzepterstellung wurden die für das Pin-Handling notwendigen Teilfunktionen des mobilen Robotersystems entwickelt und getestet. Die Teilentwicklungen umfassen im Wesentlichen das Trainieren eines Machine Learning Modells zur Erkennung der definierten Pin-Typen, die Bestimmung der benötigten Greifposition für den Endeffektor, die Berechnung der jeweiligen Öffnungs- oder Schließtrajektorie zum Erreichen des Soll-Zustandes, sowie unterschiedliche Lokalisierungs- und Navigationslösungen für die Positionsbestimmung des Roboters und Erreichen der Zielwegpunkte während der gesamten Missionsdauer. Dies beinhaltet auch das korrekte

Erkennen von Hindernissen und das entsprechende Einleiten von passenden Maßnahmen wie Ausweichen und Anhalten.

Die Computer Vision Software zur Pin-Erkennung wurde durch das Training mit zusätzlichem Bildmaterial erweitert, um die Performance bei unterschiedlichen Licht- und Wetterverhältnissen zu erhöhen. Die Schnittstellen mit dem Gesamtsystem, primär mit dem Manipulation Stack, wurden implementiert und unter Laborbedingungen sowie im Feld validiert. Da vor allem die Genauigkeit der Erkennung hinsichtlich der Pin-Position von hoher Signifikanz ist, wurde diese unter Zuhilfenahme eines Motion Capture Systems im Labor des Fraunhofer CML bestimmt.



Abbildung 3: Exemplarische Darstellung der Detektion unterschiedlicher Pin-Typen

Die Lokalisierung sowie die Navigationslösungen wurden schrittweise in das Gesamtsystem integriert und auf dem Terminal unter Realbedingungen getestet. So konnte ein sicherer Übergang von der teilautonomen Fahrt zur vollautonomen Fahrt sichergestellt werden.

Die Manipulation von Standard-Pins wurde in verschiedenen Integrationsstufen im Labor am Teststand verifiziert und am Terminal validiert. Dies schließt das Entriegeln, Öffnen, sowie Schließen der Container Pins ein.

Zwecks Minimierung von Risiken im Testbetrieb und Verkürzung von Entwicklungs- und Testzeit wurde der Roboter in einer Simulationsumgebung nachgebildet. Das Risiko von Fehlern mit Unfallfolge kann so ebenfalls minimiert werden. Die relevanten Roboterfunktionen wurden vorab in der Simulation validiert, so dass überwiegend erfolgsversprechende Roboterkonfigurationen mit der echten Hardware getestet wurden. Das Simulationsmodell wurde sowohl für die einzelnen Roboterfunktionen als auch im Zuge der Integrationsaktivitäten (vgl. Arbeitspaket 5a, Integration aller Teilfunktionen) eingesetzt.

2.1.5 AP 500

Das Arbeitspaket 500 beinhaltet den Demonstratoraufbau und die Funktionstests, die in die Integration aller Teilfunktionen, in Versuchsdefinition und Versuchsaufbau und den Systemtest im Hafentechnik-Labor unterteilt werden.

Ziele des AP

- Integration aller Teilfunktionen
- Definition und Realisierung von Integrationstests
- Identifikation (und Umsetzung) von Optimierungspotenzial
- Definition von Testszenarien für das autonome Pin-Handling im Hafentechnik-Labor
- Konstruktion eines Versuchsstands im Labor zum Testen des mobilen Robotik-Systems
- Testen des mobilen Robotik-Systems unter Laborbedingungen
- Testen des Leitstandes und der Kommunikation zum Roboter unter Laborbedingungen

Die Integration des Roboters und des Leitstandsystems erfolgte in mehreren Schritten, wobei die einzelnen spezifischen Interaktionen zwischen den zwei Systemen getestet wurde. Diese Aktivitäten erfolgten zeit- und ortsversetzt. Die Integration des Roboters in das Leitstandsystem wurde in enger Zusammenarbeit zwischen dem Fraunhofer CML und HHLA Sky realisiert und verschiedenen Prüfungen im Hafentechnik-Labor unterzogen. Nach einer ersten erfolgreichen Integration konnte bereits mit ersten Tests am Terminal begonnen werden. Diese Tests wurden in Abstimmung zwischen HHLA, HHLA Sky und Fraunhofer CML definiert und durchgeführt. In Abstimmung mit dem Praxispartner wurde zudem die Basisstation spezifiziert. Diese bietet ausreichend Platz zur Stationierung von zwei mobilen Robotern. Neben Möglichkeiten zum Laden der Akkus befinden sich in der Basisstation auch Arbeitsplätze für das Entwicklungsteam sowie ein Arbeitsplatz für die Bedienung des Leitstandes.

Vor- und Nachbereitung der Testläufe konnten somit in der unmittelbaren Nähe der Roboter realisiert werden. In Kooperation mit der HHLA und mit der HHLA Sky wurden mehrere Testkampagnen realisiert. Dabei wurden zunächst die einzelnen Roboterfunktionen isoliert unter Realbedingungen erprobt. Anschließend wurden diese Funktionen schrittweise miteinander sowie mit dem Leitstandsystem der HHLA Sky integriert und getestet. Als besonders bedeutsame Meilensteine lassen sich einerseits die erfolgreiche Umsetzung der Roboternavigation in autonomen, leitstandseitig angestoßenen Missionen, sowie andererseits die erfolgreiche Integration der Pin-Erkennung und -Manipulation hervorheben.

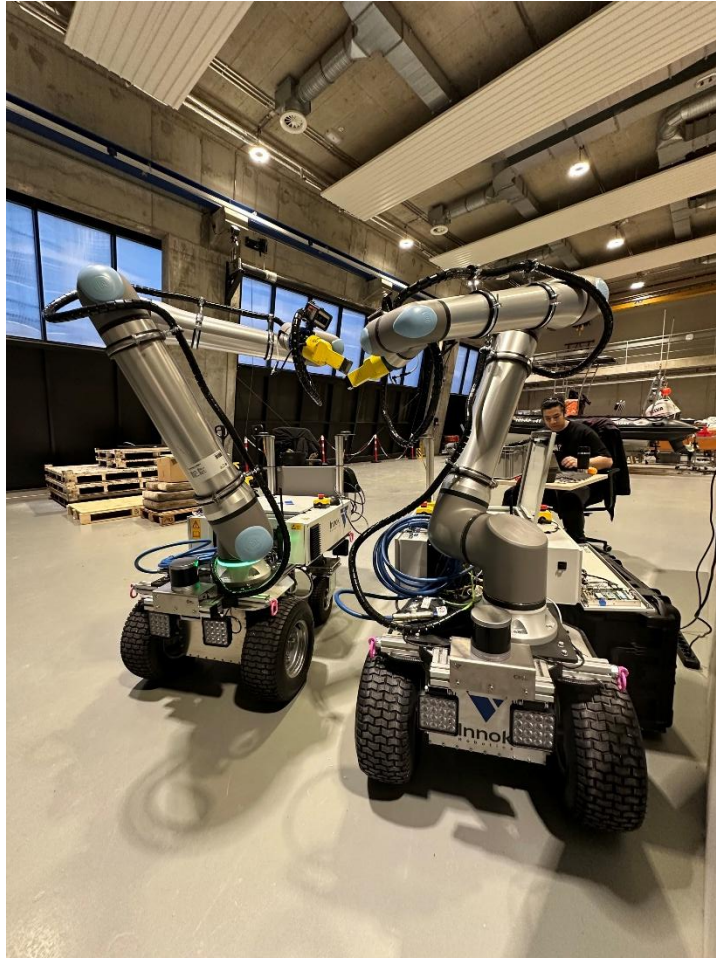


Abbildung 4: Finale Integration der Roboter im Hafentechnik Labor des Fraunhofer CML

2.1.6 AP 600

Das Arbeitspaket 600 behandelt die Pilotierung im Feld, die in die Vorbereitung der Pilotinfrastruktur, die Inbetriebnahme des Roboter- und Leitstandsystems und die Realisierung von Feldtests.

Ziele des AP

- Problemlose Aufnahme des Testbetriebs und Absolvieren der zuvor definierten Testszenerien
- Erfolgreiche Realisierung aller Tests durch das mobile Robotiksystem (vollautonomes Pin-Handling)
- Feldtests sind dokumentiert und ausgewertet

Über die Gesamtdauer des AP 600 wurden insgesamt 10 mehrtägige Testkampagnen am Container Terminal Tollerort realisiert. Dabei konnte sowohl die automatische Missionsgenerierung über den Leitstand anhand von Terminaldaten als auch das vollautonome Pin-Handling entlang eines Zuges erfolgreich demonstriert werden. Die Key Performance Takeaways des Softwarestacks sind im Folgenden gelistet:

Vollständig autonome Navigation im gesamten Bahnbereich: Das verwendete RTK-gestützte, differentielle GNSS-System lieferte akkurate Positionsdaten im Zentimeterbereich über den gesamten Missionsbereich. Vereinzelt wurden Signalstörungen registriert die aus größeren, umliegenden Metallstrukturen sowie Sonnenaktivität resultierten. Diese Störungen im Satelliten-basierten Navigationssystem des Pin-Handling Roboters konnten jedoch durch das robuste

Spurhaltesystem ausgeglichen werden. Das LiDAR- und kamerabasierte Spurhaltesystem hat über den gesamten Testzeitraum das erfolgreiche Ein- und Ausfahren in die entsprechende Spur zwischen den Gleisen sichergestellt. Die Hinderniserkennung wurde erfolgreich in verschiedenen Missionsbereichen getestet, mit dem Ergebnis, dass der Roboter stets rechtzeitig zu einem vollständigen Stopp kommt, wenn sich ein Objekt vor ihm befindet.

Detektion von definierten Pin-Typen: Das Machine Learning Model, welches anhand mehrerer tausend Bilder trainiert wurde, zeigte kontinuierlich eine gute Zuverlässigkeit in Bezug auf die definierten Pin-Typen, auch unter wechselnden Lichtverhältnissen. Alle drei betrachteten Typen sowie der entsprechende Status (offen, geschlossen) wurden korrekt, mit ausreichender Genauigkeit, klassifiziert. Die akkurate Positionsbestimmung der Pins (Abweichungen <1cm) relativ zum Roboter anhand der verwendeten 3D-Kameradaten ermöglichte unter allen Umständen eine robuste Manipulation.

Automatische Manipulation von Standard Pins aus dem ICC-Missionsablauf: Der Manipulationstack hat das vollständige Handling von Standard-Pins abgedeckt. Dies beinhaltet das Entriegeln, Öffnen und Schließen des jeweiligen Pins. Während andere Pin-Typen wie beschrieben korrekt erkannt, klassifiziert und lokalisiert wurden, beschränkt sich die tatsächliche Manipulation lediglich auf die Standard-Pins die ca. 80% des zu erwartenden Pin-Typs am CTT ausmachen.

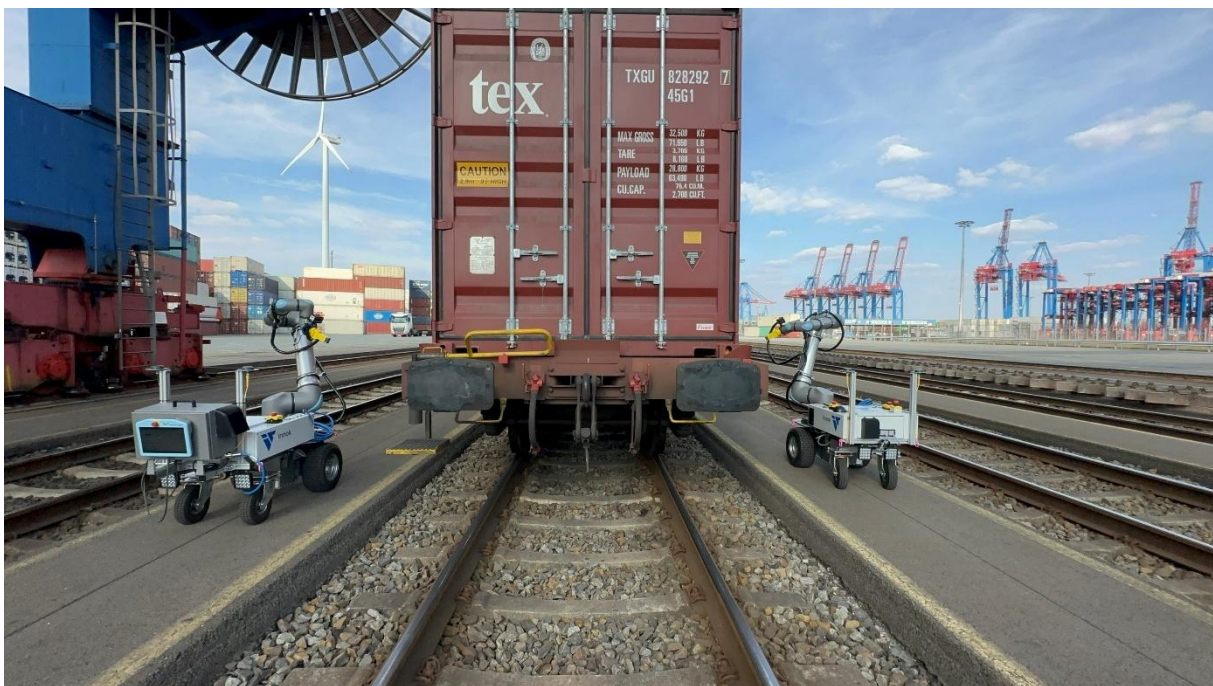


Abbildung 5: Testfahrt beider Pin-Handling Roboter am CTT

2.2 Zahlenmäßiger Nachweis

Wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises.

Die nachfolgende Tabelle 1 liefert eine Gegenüberstellung der abgerechneten Kosten und der Gesamtvorkalkulation gem. Zuwendungsbescheid. Die faktischen Personalkosten überstiegen um ca. 32.000 EUR die kalkulierten Kosten. Die Abweichung ergibt sich größtenteils aus einem höheren Aufwand in die Erstellung der Robotersimulation sowie mehr Aufwand für die Integration und parallele Erprobung des robotischen Systems. Die geringer ausgefallenen Reisekosten begründen sich darin, dass aufgrund der zahlreichen Veröffentlichungen in Fachmedien sowie aufgrund des hohen Arbeitsaufkommens in der Integrations- und Testphase des Projektes keine passende

akademische Konferenz im Ausland gefunden und besucht werden konnte. Ferner überstiegen die faktischen Ausgaben für die Roboterhardware (im Wesentlichen Roboterplattform, Greifarm, Magnetgreifer, Sensorik) den kalkulierten Betrag von 88.731,87 EUR (Position 0847). Dies ist auf zwei Gründe zurückzuführen. Einerseits war zum Zeitpunkt der Aufstellung der Kostenkalkulation im Projektantrag das finale Hardwarekonzept nicht bekannt, so dass nicht alle Positionen kalkulierbar waren. Andererseits wurden aufgrund von AfA nicht die kompletten Hardwarekosten finanziert. Demzufolge ergab sich ein Differenzbetrag von 30.256,37 EUR.

Tabelle 2: Zahlenmäßiger Nachweis

Position	Vorkalkulation [EUR]	Abgerechnete Kosten [EUR]	Differenz [EUR]	Abweichung der Differenz zur Vorkalkulation [%]
0813 (Material)	3.420,00	1.383,77	2.036,23	60%
0837 (Personalkosten)	663.263,02	695.666,88	-32.403,86	-5%
0838 (Reisekosten)	8.810,00	5.511,60	3.298,40	37%
0847 (vorhabenspezifische Abschreibungen)	88.731,87	118.988,24	-30.256,37	-34%
0850 (sonstige unmittelbare Vorhabenkosten)	19.000,00	7.604,41	11.395,59	60%
<i>SUMME</i>	<i>783.224,89</i>	<i>829.154,90</i>	<i>-45.930,01</i>	<i>-6%</i>

2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die manuelle Bearbeitung des Pin-Handlings an Containertragwagen in Seehafen-Bahnterminals ist gefahrgeneigt, kostenintensiv und impliziert Verzögerungen im Abfertigungsprozess. Durch die Entwicklung eines automatisierten Pin-Handlings für Containertragwagen mit Hilfe einer innovativen mobilen Robotik können die Arbeitssicherheit und die Arbeitsplätze der Kollegen verbessert, die Gesamttransportkosten im Seehafenhinterlandverkehr reduziert und die Terminalprozesse optimiert werden.

Aus der sicherheitskritischen, kostenintensiven und für den Bahnumschlag prozessbestimmende Natur des manuellen Pin-Handlings sowie dem Fehlen marktreifer Alternativen ergab sich der Bedarf für ein systematisches Entwicklungs- und Validierungsvorgehen. Um die Machbarkeit unter Realbedingungen zu belegen, wurden aufeinander aufbauend IST-Analyse, SOLL-Prozessdefinition, Architektur- und Hardwarekonzept, die Auswahl marktverfügbarer Komponenten (z.B. Cobot mit ausreichender Traglast und Reichweite und mobile Plattform entsprechend der Anforderungen), die Entwicklung der Teilfunktionen (Navigation, Objekterkennung, Manipulation, Datenübertragung) sowie Integration, Laborvalidierung und Feldpilotierung umgesetzt. Die gewählten Methoden (RTK-gestütztes GNSS mit LiDAR-/Kamera-Spurhaltung, ML-basierte Pin-Klassifikation und -Lokalisierung, simulationsgestützte Vorabtests) entsprechen dem Stand der Technik und sind für das dynamische, sicherheitsrelevante Umfeld eines KV-Bahnhofs sachgerecht. Die frühzeitige Einbindung von Arbeitsschutz, Berufsgenossenschaft und EBA war aufgrund des gemischt genutzten Arbeitsraums folgerichtig.

Effiziente Mittelverwendung, die Nutzung vorhandener Bausteine (Leitstandplattform HHLA Sky, am Markt verfügbare Hardwarekomponenten) und eine konsequent risikominimierende Vorgehensweise (Simulation, schrittweise Integration, Feldtests, Einbeziehen der maßgeblichen Berufsgenossenschaft) belegen die Angemessenheit im Kontext des Gesamtprojekts. Trotz externer Verzögerungen bei Beschaffungsprozessen und Lieferungen, sowie einzelner Hardwaredefekte, wurden Arbeitspakete bedarfsgerecht priorisiert: In zehn mehrtägigen Testkampagnen wurden die vollständig autonome Navigation im Bahnbereich, die zuverlässige Detektion von sechs definierten Pin-Typen inklusive Zustandsklassifikation sowie die robuste Manipulation der Standard-Pins demonstriert – ein dem anvisierten TRL-6 entsprechender Nachweis unter Realbedingungen. Damit leistet das Vorhaben einen unmittelbaren Beitrag zu den IHATEC-Zielen Sicherheit, Effizienz, und Digitalisierung und belegt die Übertragbarkeit des Ansatzes.

Identifizierte Optimierungspfade wie z. B. vorgelagerte Pin-IST-Erfassung via Traingate oder der Einsatz sicherheitszertifizierter Scanner sind konsequent, liegen aber außerhalb des Projektumfangs und unterstreichen, dass Tiefe und Umfang der Arbeiten für Zielerreichung und Anschlussfähigkeit angemessen gewählt waren.

2.4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Das Vorhaben liefert mit dem funktionsfähigen Demonstrator einen belastbaren Ausgangspunkt für den operativen Einsatz und die wirtschaftliche sowie wissenschaftliche Verwertung. In zehn Testkampagnen wurden die vollständig autonome Navigation im Bahnbereich, die zuverlässige Detektion von sechs Pin-Typen einschließlich Zustandsklassifikation sowie die automatische Manipulation der Standard-Pins (am CTT ca. 80 % der Fälle) unter Realbedingungen nachgewiesen. Im Regelbetrieb wird das System eine signifikante Erhöhung der Arbeitssicherheit durch die Verlagerung von Tätigkeiten aus dem Gefahrenbereich, eine Entlastung der Belegschaft und die Qualifizierung neuer Leitstands- und Wartungsrollen ermöglichen. Mit der durchgängigen TOS/Leitstands-Integration steigen Transparenz und Planbarkeit des Umschlags.

Die Beschleunigung des Abfertigungsprozesses erhöht die Gleis- und Terminalkapazität und senkt Kosten. Je Terminal sind bei einer Umstellung vom manuellen auf den robotergestützten Prozess Nettoeinsparungen im mittleren sechsstelligen Euro-Bereich pro Jahr realistisch. Parallel begünstigt die Kapazitätssteigerung die Verlagerung von Verkehren auf die Schiene und damit substantielle CO₂-Einsparungen (Größenordnung CTA-Skala: bis zu rund 60.400 t CO₂ pro Jahr bei zusätzlicher Zugabfertigung). Aufgrund der homogenen Prozesse im KV-Bereich und der modularen Architektur (mobiler Roboter, Leitstand, TOS-Schnittstellen) ist die Lösung auf andere See- und Binnenhafenstandorte übertragbar – national wie europäisch was ein hohes wirtschaftliches Verwertungspotenzial birgt.

Für einen potenziellen Übergang in einen operativen Produktbetrieb stehen vier Weiterentwicklungsfelder im Fokus.

- Erstens verkürzt eine vorgelagerte automatische IST-Erfassung der Pin-Zustände beim Einfahren des Zuges (z. B. per Traingate/OCR-Portal) die Missionsdauer signifikant: Der Roboter fährt nur noch Abweichungen vom Verladewunsch an, statt jeden Pin als Wegpunkt zu prüfen. Bei den aktuellen Planungsdaten führt das Anfahren jedes einzelnen Pins zu Laufzeiten von bis zu 15 Stunden pro Zug.
- Zweitens ist die Datenlage zu konsolidieren: Belastbare Stammdaten zu Wagengattungen und Pin-Geometrien (inkl. Varianten, Verschiebepins), ein gepflegter Wagen-Geometrie-Katalog, saubere Koordinatenmodelle (GK/WGS84-Transformation), Quality Gates und Plausibilitätsprüfungen für Verladewunschcodes sowie eine bidirektionale, ereignisgetriebene Schnittstelle zum TOS/EDI.
- Drittens sind die Schritte zum Produktionseinsatz zu definieren und umzusetzen: Gefährdungsbeurteilung und Sicherheitskonzept, Einsatz sicherheitszertifizierter Laserscanner und zusätzlicher, redundanter Sicherheitsvorkehrungen, Validierung der funktionalen Sicherheit (z. B. nach ISO 13849/IEC 61508), CE-Konformität, abgestimmte Betriebs- und Freigabeprozesse mit Arbeitsschutz, Berufsgenossenschaft und EBA. Ein gestufter Rollout (Schattenbetrieb, begleiteter Betrieb, 24/7) mit Site-Acceptance-Tests, Wartungs- und Ersatzteilkonzept sowie Cyber-Security gemäß ISO 27001/IEC 62443 begleiten die mögliche Inbetriebnahme.
- Viertens wird die stärkere Einbindung der Mitarbeiter systematisch verankert: Co-Design-Workshops mit Checker-Teams, frühzeitige Unterweisungen und Qualifizierungen für

Leitstand, Teleassistenz und Instandhaltung, klare SOPs, Feedbackschleifen zur HMI-Optimierung und eine enge Einbindung von Betriebsrat erhöhen Akzeptanz, Sicherheit und Prozessqualität.

Die Verwertungsperspektive ist doppelt tragfähig: **Wissenschaftlich** werden Datensätze zu Navigation, Pin-Detektion und Manipulation unter Realbedingungen, Methoden zur robusten Sensorfusion im Gleisumfeld, Ansätze zur Trajektorienplanung unter Kontaktlast sowie Leitstands- und Multi-Roboter-Dispositionsbausteine bereitgestellt. Daraus erwachsen Anschlussarbeiten zu Sliding-Pins, erweiterten Pin-Typen, Sim-to-Real-Transfer mit Digital Twin, Wetterrobustheit und Human-Robot-Collaboration in gemischt genutzten Zonen. Die Ergebnisse sind in zusätzlichen Publikationen, standardisierten Benchmark-Szenarien und kooperativen Forschungsvorhaben mit Industrie und Hochschulen verwertbar. **Wirtschaftlich** ist eine Produktreife und mögliche Skalierung im Fokus, perspektivisch mit Industriepartner für Serienfertigung und Vertrieb. Das Marktpotenzial erstreckt sich auf eine Vielzahl von KV-Terminals. Gleichzeitig lassen sich Leitstand- und Robotikbausteine in angrenzenden Anwendungen (Inspektion, Service, Materialtransport) verwerten und sichern wissenschaftlich-technische Anschlussfähigkeit.

2.5 Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Im Bereich der Automatisierung des Bahnnumschlags gibt es weiterhin keine öffentlich dokumentierte Lösung, die den spezifischen Use-Case des automatisierten Pin-Handlings auf Containertragwagen adressiert. Gleichwohl sind relevante Fortschritte in angrenzenden Teilbereichen zu verzeichnen, die den Reifegrad der Gesamtautomatisierung im KV-Bereich erhöhen: So werden an zahlreichen Standorten automatisierte bzw. remote betriebene RMG-Systeme eingesetzt (u. a. Lösungen von Künz und Konecranes) und mit TOS-Integration, OCR (Visy) und Assistenzfunktionen für Zug- und Containeridentifikation kombiniert. Auf der Sensorik- und Inspektionsseite haben sich kamerabasierte Bahn-/Zuginspektionsportale und KI-gestützte Zustandsüberwachung etabliert (z. B. SBB Cargo mit Automatic Train Inspection, marktseitig u. a. Camco Rail OCR und RailWatch), die die Verfügbarkeit von Echtzeitdaten zur Zug- und Ladeinheit signifikant verbessern. Auf der Wasserseite belegen automatische Twistlock-Handling-Systeme (z. B. RAM PINS-MART) die technische Machbarkeit robotischer Manipulation an Sicherungselementen unter Hafenbedingungen.

Gleichzeitig treiben europäische Programme zur Digitalisierung des Güterverkehrs (z.B. die Digitale Automatische Kupplung DAK) die Standardisierung von Schnittstellen und die durchgängige Datenverfügbarkeit voran und schaffen damit günstige Rahmenbedingungen für weitere Automatisierungsschritte im Bahnnumschlag. Mobile Robotik und Teleoperation werden vermehrt für Inspektions- und Serviceaufgaben in industriellen Außenbereichen pilothaft erprobt, was sicherheitsgerichtete Sensorik, Navigationslösungen und Leitstandsüberwachung, besonders in Bezug auf den Einsatz in Häfen und Terminals, weiter reifen lässt. Zusammengenommen existiert somit ein belastbares technologisches Umfeld aus Kranautomation, visueller Inspektion und digitaler Integration, das den Ansatz des Pin-Handling-mR fachlich stützt; eine spezifische, übertragbare Lösung für das automatisierte Pin-Handling im Bahnbereich ist außerhalb des Vorhabens jedoch weiterhin nicht öffentlich verfügbar.

2.6 Veröffentlichungen

Über die gesamte Projektlaufzeit ist „Pin-Handling-mR“ öffentlichkeitswirksam von diversen Vorträgen, Medienberichten und anderweitigen Veröffentlichungen begleitet worden. Dazu zählen insgesamt sechs Beiträge auf relevanten Fachkonferenzen, wie der TOC Europe (Bergmann, Fuss, 2024, „Automated pin setting on container carrying wagons – Vision, conception and

implementation“, Terminal Operators Conference, Rotterdam), der CTAC (Bergmann, 2023, „Mobile Robotics – A technology supporting the terminal digitalization“, Container Terminal Automation Conference, Hamburg), der HICL (2024, Hamburg International Conference of Logistics), sowie insgesamt drei Beiträgen bei den Maritime Innovation Insights (MII) des Fraunhofer CML (Fuss, Bergmann, 2024, „Automatisierung des Pin-Handlings beim Bahnumschlag – Anwendungspotenziale und Entwicklungsstand“, Maritime Innovation Insights, Hamburg), (Nuernberger, Müller, 2025, „Wie mobile Robotik das Pin-Handling an Containerzügen neu definiert“, Maritime Innovation Insights, Hamburg). Zudem wurde das Projekt online bei insgesamt drei Fachvorträgen vorgestellt, unter anderem bei dem ShortSeaShipping Inland Waterway Promotion Center (Bergmann, 2023, „Automatisierung im Containerumschlag – Überblick und Trends“) und dem Maritime Innovation Update (Gupta, 2024, „Pin-Handling-mR - 3D Container Pin Classification and Segmentation“).

Umfassende (Fach-)Artikel erschienen im Baltic Transport Journal (Bergmann et al., 2025, „Pin up & down“, Ausgabe 2025-01, pp. 76-77), der Schifffahrt und Technik (Roeser, 2023, „Roboter sollen Pin-Handling an Tragwagen übernehmen“), dem Pegelstand Newsletter (vgl. Abbildung 16) und der World Cargo News (2024, „Automating pin-setting for rail operations“, vgl. Abbildung 17). Weiterhin wurde von mehreren branchenrelevanten Medienoutlets über den erfolgreichen Projektabschluss berichtet, so von „Hamburg Business“, erneut den „World Cargo News“, „Eurotransport“, dem „Internationales Verkehrswesen“ und weitere.

Das physische Robotiksystem konnte unter anderem auf der IHATEC-Fachkonferenz (vgl. Abbildung 15), wie auch der Ausstellung auf der TOC Europe in Rotterdam von interessierten Besuchern begutachtet werden. Im Kontext der wissenschaftlichen Nutzung wurden insgesamt drei wissenschaftliche Arbeiten angefertigt, die relevante Themen des Pin-Handlings durch robotische Lösungen behandelt haben und deren Ergebnisse direkt in die weitere technische Entwicklung des Systems einfließen. Parallel wurde das Projekt kontinuierlich durch eine Social Media Präsenz, primär auf LinkedIn, begleitet.

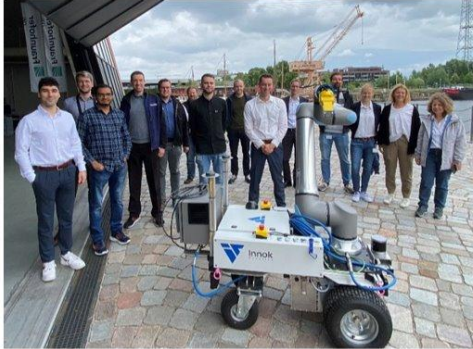


Abbildung 6: Stand auf der IHATEC Fachkonferenz, Oktober 2023 (von links: Johann Bergmann, Kaushalkumar Patel, Marius Nuernberger, Britta Sommer, Celina Fuss, Dr. Holger Müller)

IHATEC Pin-Handling-mR | Konsortialtreffen



Automatisierung des sogenannten Pin-Handlings bei Containertragwagen durch mobile Robotik für einen effizienten Transport auf der Schiene bei gleichzeitiger Erhöhung der Arbeitssicherheit.



Gruppenfoto des Konsortialtreffens

Der effiziente und schnelle Transport von Containern per Bahn spielt eine signifikante Rolle bei der Wettbewerbsfähigkeit deutscher Häfen.

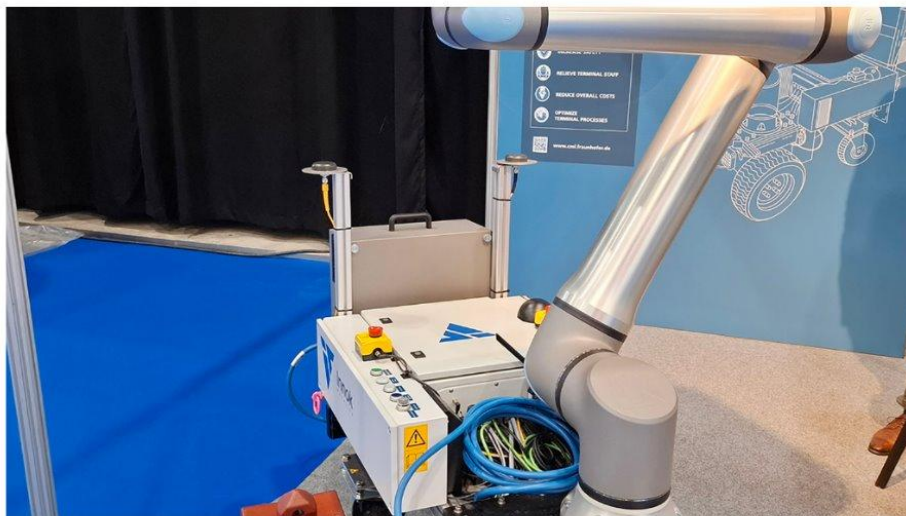
Die Container werden beim Transport auf der Schiene mit speziellen Verriegelungssystemen, den sogenannten Pins, gesichert, welche auf den Tragwagen montiert sind. Derzeit müssen diese vor Beladung des Containerzuges entsprechend des Beladungsschemas durch Terminalmitarbeitende manuell hoch- oder heruntergeklappt werden. Die Automatisierung dieses Prozesses bietet viel Potenzial, um die Arbeitssicherheit zu erhöhen und die Betriebskosten zu senken.

Abbildung 7: Bericht im IHATEC-Newsletter Pegelstand, August 2024)

🏠 | PORTS & TERMINALS | CARGO HANDLING EQUIPMENT | SHIPPING & LOGISTICS | **BULK** | IN-DEPTH |

Automating pin-setting for rail operations

Published on 03-11-2024 at 07:00



The prototype robot on display at TOC Europe © Image: WorldCargo News

Abbildung 8: Bericht in World Cargo News, November 2024

2.7 Quantitative und qualitative Effekte

Das Projekt Pin-Handling-mR erzielt Wirkungen auf verschiedenen Gebieten. Besonders hervorzuheben ist perspektivisch der Beitrag zur Arbeitssicherheit, da durch den Wegfall manueller Tätigkeiten im Gleisbereich das Unfallrisiko deutlich sinkt und jährlich pro Terminal bis zu 1,5 Unfälle vermieden werden können. Gleichzeitig führt die Automatisierung zu einer spürbaren Entlastung der Beschäftigten, indem monotone und gefährliche Tätigkeiten entfallen und neue qualifizierte Aufgaben in Leitstand und Wartung entstehen.

Auch ökonomisch sind die Effekte erheblich: Wenn das Robotersystem voll einsatzfähig ist, lassen sich pro Terminal jährliche Nettoeinsparungen im mittleren sechsstelligen Bereich erzielen, während die Prozesszeiten spürbar sinken. Durch die Beschleunigung der Abfertigung kann die Umschlagsleistung um bis zu 16 % gesteigert werden. Diese Effizienzgewinne erhöhen zugleich die Wettbewerbsfähigkeit der Schiene gegenüber der Straße. Das System leistet daher auch einen Beitrag zur CO₂-Reduktion, indem es eine stärkere Verlagerung des Güterverkehrs von der Straße auf die Schiene ermöglicht. Beispielhaft könnten am Schwesterterminal CTA in Hamburg durch die zusätzliche Abfertigung jährlich bis zu 60.400 Tonnen CO₂ eingespart werden.

Darüber hinaus ergeben sich wissenschaftlich-technische Fortschritte:

Über den Projektverlauf, vor allem im Zuge des AP400, wurde ein insgesamt 6000 Bilder umfassender Datensatz der im Projekt abgebildeten Pin-Typen am Container Terminal Tollerort erstellt, verarbeitet und für die Weiterverwendung gelabelt. Dieser Datensatz bildet die Grundlage für das trainierte Computer Vision Modell für die automatische Pin-Detektion und stellt ein Novum in diesem Forschungsbereich dar. Für anschließende Arbeiten bietet sowohl der Datensatz als auch das resultierende Modell ein stabiles Fundament für weitreichende Forschung.

Mit der erfolgreichen Entwicklung von Navigations- und Erkennungssystemen, der robusten Manipulation von Standard-Pins sowie der Erweiterung des HHLA Sky Leitstands auf Bodenfahrzeuge wurde ein neuartiges Gesamtsystem geschaffen. Die entstandenen Erfahrungen eröffnen neue Ansätze für Forschung, Standardisierung und industrielle Umsetzung, womit die Lösung eine hohe Anschlussfähigkeit und Skalierbarkeit für weitere KV-Terminals bietet.

Die Wirkungskette wird in der nachfolgenden Abbildung 9 veranschaulicht.

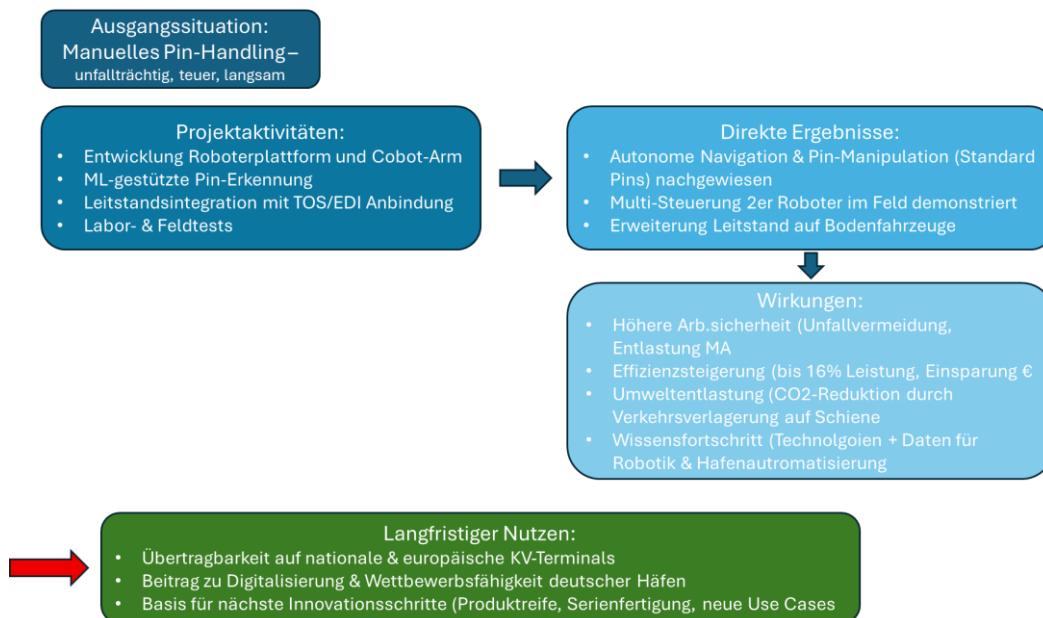


Abbildung 93: Veranschaulichung der Wirkungskette