

Schlussbericht

RangierTerminal4.0



Förderkennzeichen: 19H20003F

Datum: 31.05.2024

Zuwendungsempfänger:

JadeWeserPort Realisierungs GmbH & Co. KG

Container Terminal Wilhelmshaven JadeWeserPort-Marketing GmbH & Co. KG

Westfälische Lokomotiv-Fabrik Reuschling GmbH & Co. KG

dbh Logistics IT AG

Technische Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm; Institut für Fahrzeugtechnik

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V.; Institut für Verkehrssystemtechnik

Konsortialführung:

JadeWeserPort Realisierungs GmbH & Co. KG (JWP-R)
Pazifik 1
26388 Wilhelmshaven
www.jadeweserport.de

Projektpartner:

Container Terminal Wilhelmshaven JadeWeserPort-Marketing GmbH & Co. KG (JWP-M)
Pazifik 1
26388 Wilhelmshaven
www.jadeweserport.de

Westfälische Lokomotiv-Fabrik Reuschling GmbH & Co. KG (WLH)
Eickener Str. 45
45525 Hattingen
www.reuschling.de

dbh Logistics IT AG
Martinistr. 47-49
28195 Bremen
www.dbh.de

Technische Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm (THN)
Institut für Fahrzeugtechnik
Keßlerplatz 12
90489 Nürnberg
<https://www.th-nuernberg.de/einrichtungen-gesamt/in-institute/institut-fuer-fahrzeugtechnik>

Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt e.V. (DLR)
Institut für Verkehrssystemtechnik
Lilienthalplatz 7
38108 Braunschweig
<https://www.dlr.de/de/ts>

Autoren:

Name	Projektpartner
Romina Hanisch	JWP-R, JWP-M
Ralf Falgenhauer	THN
Dr.-Ing. Jannis Sinnemann	WLH
Frank Hermanowski	dbh Logistics IT AG
Andreas Grunwald	dbh Logistics IT AG
Dr. Michael Roth	DLR
Jakob Geischberger	DLR

Inhalt

1	Kurzdarstellung	8
1.1	Aufgabenstellung und Teilziele (Kurzfassung)	8
1.2	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	8
1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens	9
1.4	Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde	9
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	11
2	Eingehende Darstellung der Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele	12
2.1	Teilziel „Infrastruktur“	12
2.1.1	IST-Prozess	12
2.1.2	Zielbild	13
2.1.3	SOLL-Prozess	14
2.2	Teilziel „Betriebsmittel“	17
2.2.1	RT40-Modul	17
2.2.2	Kommunikation zwischen Infrastruktur und Lokomotive	18
2.2.3	Ortung	19
2.2.4	Steuerung ADCU	21
2.2.5	Funktionsabläufe	22
2.2.6	Steuerung PBC	24
2.2.7	Sensorik	25
2.2.8	Funktionsprüfung der Komponenten und Integrationstest des Zusammenwirkens	27
2.3	Teilziel „Steuerung“	27
2.3.1	Integration der IT-Systeme	27
2.3.1.1	Systemumgebung und technische Anbindung	27
2.3.1.2	Kommunikation und Formate	28
2.3.2	Schnittstellen zwischen Bahnbetrieb und Containerumschlag	28
2.3.3	Optimierung der Prozessabläufe	29
2.3.4	Datenaufzeichnung: Potential für Bewegungsmodelle in der Eisenbahnbetriebssimulation	30
2.3.5	Vollautomatische Durchführung der Rangierbewegungen durch eine automatisierte Rangierlokomotive	32

2.3.5.1	Test und Validierung.....	32
2.3.5.2	Dauererprobung.....	33
2.3.5.3	Ergebnisse der Dauererprobung	35
3	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	38
4	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	38
5	Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans	39
6	Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen.....	41
7	Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses	41

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Luftbild JadeWeserPort (Quelle: JWP)	12
Abbildung 2: Zielbild	14
Abbildung 3: Aufbau Lokomotive, mit zusätzlich erforderlichen Modulen für ein automatisiertes Rangieren, Quelle: THN	17
Abbildung 4: Kommunikationsarchitektur zwischen RT40-Modul und der Lokomotive	19
Abbildung 5: GNSS-Antennen der Ortungseinheit auf der Rangierlok.	20
Abbildung 6: Hardwarekomponenten (links) und Ortungseinheit (rechts) im Führerstand der Rangierlok.	20
Abbildung 7: Kalkulation Anhalteweg	21
Abbildung 8: Ausführen eines Rangierauftrags.....	22
Abbildung 9: Durchführen von Rangieraufträgen mit Rangierkupplung.....	23
Abbildung 10: Verhalten beim Detektieren von Hindernissen.....	23
Abbildung 11: Rangierauftrag mit Ansetzen.....	23
Abbildung 12: Kommunikationsarchitektur zwischen ADCU, PBC und Loksteuerung	25
Abbildung 13: Regelstrecke der PBC	25
Abbildung 14: VSU - Vehicle Sensor Unit	26
Abbildung 14: LiDAR 4Sight M	26
Abbildung 15: LiDAR-Punktwolke	26
Abbildung 17: Kommunikation zwischen WEB-Anwendung RT40 und LOK	28
Abbildung 18: Testfeld im JWP, für die Demonstration zweier Use Cases (Skizze), Quelle: THN	34

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Arbeitspakete	9
Tabelle 2: Szenario 1	34
Tabelle 3: Szenario 2	34

Abkürzungsverzeichnis

ADCU	Autonomous Decision and Control Unit
CAN	Controller Area Network
CODIS	Central Organising, Dispatching and Information System
DLR	Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt e.V.
EVU	Eisenbahnverkehrsunternehmens
Fdl	Fahrdienstleiter
FFS	Funkfernsteuerung
GNSS	Global Navigation Satellite Systems
IMU	Inertial Measurement Unit
J.I.M	Jobbased Intelligent Monitoring
JWP	JadeWeserPort
KF	Kalman-Filtern
LTE	Long Term Evolution
OSIS	Open System Integration-Plattform
PBC	Power and Break Control
ROS	Robot Operating System
THN	Technische Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm
UTM	Universales Transversales Mercator-System
VCM	Vehicle Communicaton Module
VSU	Vehicle Sensor Unit
WLH	Westfälische Lokomotiv-Fabrik Reuschling GmbH & Co. KG

1 Kurzdarstellung

1.1 Aufgabenstellung und Teilziele (Kurzfassung)

Das Gesamtziel des Projektes RangierTerminal4.0 ist es, mit einer entsprechend ausgerüsteten Rangierlokomotive vollautomatisch Containerzüge zu rangieren und dabei die Fahrten optimiert nach den Anforderungen des Containerumschlags und des Bahnbetriebs durchzuführen.

Das beschriebene Gesamtziel soll über die folgenden Teilprojekte erreicht werden.

1. Teilziel „Infrastruktur“: Aufbau einer Eisenbahninfrastruktur, die den autonomen Betrieb einer Rangierlokomotive zulässt. Hier sind insbesondere Erfahrungen hinsichtlich Positionserkennung und Eingriff in den automatisierten Bereich durch Dritte zu sammeln, Lösungen zu finden und umzusetzen.
2. Teilziel „Betriebsmittel“: Entwicklung einer Rangierlok, die den autonomen Betrieb auf einer geeigneten Infrastruktur zulässt: Eine herkömmliche Rangierlokomotive ist hinsichtlich ihrer Sensorik entsprechend und analog dem Teilziel 1 anzupassen. Es sind Verfahren für die Steuerung und Kommunikation mit der Infrastruktur und Disposition zu entwickeln.
3. Teilziel „Steuerung“: Neben der Automation der Rangierlokomotive stellt die Integration der IT-Systeme einen relevanten Schwerpunkt dar. Im Hinblick auf die heutzutage systemunabhängig voneinander stattfindenden Planungsprozesse des Bahnbetriebs und des Containerumschlags gilt es, Schnittstellen zu schaffen, die den Datenaustausch zwischen den Tools und mit der neugeschaffenen Plattform zur Optimierung der Rangierfahrten vereinfachen und beschleunigen sollen. Die Planung der Rangierfahrten wird auf die vorhandenen Prozesse des Containerumschlags abgestimmt, um so die Prozessabläufe gesamtheitlich zu optimieren. Die resultierenden Rangierbewegungen sollen anschließend durch eine automatisierte Rangierlokomotive vollautomatisch durchgeführt werden.

1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Die Erprobung der automatisierten Rangierfahrt findet auf dem Gelände des JadeWeserPorts in Wilhelmshaven statt. Auf dem Gelände des Hafens erstreckt sich entlang der nördlichen Hafenkante eine Gleisanlage, die speziell für die ein- und ausfahrenden Güterzüge konzipiert ist – die sogenannte Vorstellgruppe. Diese Gleisanlage umfasst insgesamt 16 Gleise mit Längen zwischen 655 und 822 Metern und bietet Platz für bis zu 13 Güterzüge. Von der Vorstellgruppe aus führen jeweils ein Einfahr- und ein Ausfahrgeleis zu den sechs Terminalgleisen. Die Gestaltung des Terminals sieht vor, dass es am Kopf Gleisabschlüsse ohne Durchfahrmöglichkeit gibt.

Der Betrieb der Anlage erfolgt auf klassische Weise durch ein Elektronisches Stellwerk (ESTW), das manuell bedient wird. Die elektrifizierte Vorstellgruppe erfüllt dabei die Funktion einer zentralen „Drehscheibe“ für die Zusammenstellung der Züge, die sowohl aus dem Containerterminal als auch aus dem angeschlossenen Güterverkehrszentrum in das deutsche elektrifizierte Streckennetz gelangen.

Im Jahr 2022 wurde zur Reduzierung des CO₂-Ausstoßes die Zuführungsstrecke von Oldenburg elektrifiziert. Dies ermöglicht nun das Rangieren ohne Oberleitung mittels Rangierlokomotiven. Zuvor brachte eine Streckenlokomotive mit Dieselantrieb den Güterzug direkt in das Containerterminal. Durch

die Elektrifizierung ist der Einsatz von separaten Rangierlokomotiven nun notwendig geworden. An der Grenze zum Terminal und zum Güterverkehrszentrum erfolgt nun ein Systemwechsel: Die elektrische Streckenlokomotive wird abgekoppelt, und eine Rangierlokomotive übernimmt die Rangieraufgaben, da die Terminalgleise aufgrund der Kranverladung nicht elektrifiziert sind. Diese Elektrifizierung hat sowohl infrastrukturell als auch eisenbahnbetrieblich erhebliche Veränderungen im Terminal mit sich gebracht.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Projektlaufzeit des Vorhabens war 01.06.2020 - 31.11.2023. Tabelle 1 zeigt die geplanten Arbeitspakete des Projektes und deren initial anvisierte Dauer (es erfolgte eine pandemiebedingte Verlängerung um sechs Monate). In der nachfolgenden Ergebnisdarstellung werden die AP-Bezeichnungen entsprechend erneut aufgegriffen.

Tabelle 1: Arbeitspakete

Name	Start (Monat)	Ende (Monat)	Dauer (Monate)
AP1: Projektmanagement	1	36	36
AP2: Anforderungen & Systemkonzepte	1	6	6
AP3: Tech. Entwicklung Fahrzeug	7	19	13
AP4: Tech. Entwicklung Infrastruktur	7	19	13
AP5: Integration & Implementierung	18	23	6
AP6: Anbindung des Demonstrators	7	19	13
AP7: Test & Validierung	21	23	3
AP8: Dauererprobung	23	35	13
AP9: Datenauswertung	34	36	3
AP10: Öffentlichkeitsarbeit & Verwertungsplanung	1	36	36

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Nachfolgend ist der wissenschaftliche und technische Stand, an den zum Zeitpunkt des Projektstarts angeknüpft wurde, anhand entsprechender Vorarbeiten der einzelnen Projektpartner aufgeführt:

- **ITK-Plattform:** Ein zentrales Modul des dbh-PCS ist CODIS (Central Organising, Dispatching and Information System). Mit diesem Modul bietet dbh eine zentrale und neutrale Kommunikationsplattform für die Organisation und Abwicklung des schienengebundenen Güterverkehrs in den angeschlossenen Seehäfen an.
- **Automatisiertes Rangieren:** Die TH Nürnberg hat im Kooperationsprojekt VAL2020 mit der gewerblichen Wirtschaft für den bestimmten Anwendungsfall des Rangierens an einem Ablaufberg die Machbarkeit in einem Forschungsprojekt aufgezeigt (Cichon & Schaal, 2018) (Cichon & Schaal, 2020). Eine Rangierlokomotive wurde hierfür mit zwei Sensoreinheiten, einer Ortung und einer Steuerung ausgerüstet und ist in der Lage, einzelne, genau definierte Fahr-

und Bremsmanöver unter vorgegebenen Randbedingungen an einem Ablaufberg auszuführen. Sie stellt als Demonstrator die grundsätzliche technische Machbarkeit dar.

- Die Erforschung der Teilautomatisierung des Rangierens war darüber hinaus Inhalt des Forschungsprojekts „RANGierASSistenz“ der Westfälischen Lokomotiv-Fabrik Reuschling. Im Projekt wurde, mit der Anforderung, die technische Machbarkeit in Kombination mit dem Vermarktungspotenzial zu beleuchten, die Entwicklung eines geeigneten Systems auf Basis von Automobilsensorik und der zugehörigen Algorithmen zur Hinderniserkennung und Zielbremsung erprobt.
- Die Erfahrungen aus den Projekten VAL2020 und RANGierASSistenz stellten eine wertvolle Basis für das geplante Vorhaben RangierTerminal4.0 dar. So können beispielsweise grundsätzliche Strategien zur Fahr- und Bremssteuerung sowie der sensorbasierten Hinderniserkennung genutzt und weiter verbessert werden.
- Ortung von Rangierlokomotiven: Im Rahmen des IHATEC-Projekts „Ortung im Hafen“ wurden vom DLR Rangierloks im Hamburger Hafen mit Sensorsystemen ausgestattet, um gleisgenaue Positionsinformationen zu generieren. Das Thema der genauen Ortung in Containerterminals wurde ebenfalls vom DLR im Projekt „Neue Technologieansätze für automatisierbare Terminals im kombinierten Verkehr“ gefördert durch das BMWi, im Teilvorhaben „Hochpräzise, verlässliche Ortung von Kranen und mobilen Einheiten“ behandelt (Reimer, Noack, Scheier, & Meyer zu Hörste, 2011). Ebenfalls unterhält das DLR eine langjährige Kooperation mit dem Braunschweiger Hafen, auf dessen Gelände Forschungsvorhaben im Praxisbetrieb getestet werden. Eine Kooperation findet im IHATEC-Projekt HavenZuG statt, bei der neben Fragen der Instandhaltung auch die Ortung von Rangierlokomotiven für die Georeferenzierung von Messdaten (Offline-Ortung) untersucht wurde.
- Offene Schnittstellenarchitektur zur Datenübertragung (J.I.M.): Die WLH hat eine herstellernerneutrale Plattform zur Erfassung von Steuerungs- und Sensordaten auf dem Fahrzeug entwickelt. Im Rahmen des durch das BMWi geförderten Forschungsprojekts a³-Lok (Förderkennzeichen ZF4060716SS7) konnte das System zu einer bidirektionalen Lösung weiterentwickelt werden, so dass nicht nur Daten vom Fahrzeug zur Landseite gelangen, sondern Datenübertragungen zum Fahrzeug zuverlässig ermöglicht werden. Somit werden neuartige Konzepte wie Remote-Diagnose, Software-Wartung und die online-Beeinflussung von Betriebsparametern angeboten (Predictive und Prescriptive Maintenance). Das System wird bereits auf zahlreichen Fahrzeugen im Übergang in den Realbetrieb genutzt. Im Rahmen des Forschungsprojekts RangierTerminal4.0 kann das System als erste Grundlage für die Realisierung der Schnittstellen zwischen Fahrzeug und Sensoren (auf dem Fahrzeug) und der übergeordneten Verbindung zwischen ITK-Plattform und Fahrzeug (funkbasiert) im Projekt genutzt werden.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Rahmen des Projektes spielte die Zusammenarbeit mit verschiedenen externen Stellen eine entscheidende Rolle. Insbesondere ermöglichte die enge Kooperation mit der Landeseisenbahnaufsicht, sicherheitsrelevante Aspekte zu berücksichtigen und die regulatorischen Anforderungen im Bahnbetrieb zu erfüllen.

Auch die Zusammenarbeit mit Eisenbahnverkehrsunternehmen war von zentraler Bedeutung bei der Implementierung und Erprobung neuer Technologien im praktischen Betrieb. Durch den regelmäßigen Austausch konnten die Anforderungen und Bedürfnisse der Verkehrsunternehmen berücksichtigt und die entwickelten Lösungen nahtlos in deren Betriebsabläufe integriert werden.

Des Weiteren war die Zusammenarbeit mit lokalen Rangierdienstleistern wichtig, um praxisnahe Erkenntnisse zu gewinnen und die Funktionalität der automatisierten Rangiertechnologie unter realen Bedingungen zu testen. Durch die enge Zusammenarbeit konnte wertvolles Feedback erhalten und die Effizienz sowie die Sicherheit des Rangierbetriebs kontinuierlich verbessert werden.

Insgesamt trug die erfolgreiche Zusammenarbeit mit diesen verschiedenen Stellen maßgeblich dazu bei, dass das Projekt die Ziele erreichen konnte und einen wichtigen Beitrag zur Weiterentwicklung des Bahnbetriebs geleistet hat.

2 Eingehende Darstellung der Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Das Gesamtziel des Projektes RangierTerminal4.0 war es, mit einer entsprechend ausgerüsteten Rangierlokomotive vollautomatisch Containerzüge zu rangieren und dabei die Fahrten optimiert nach den Anforderungen des Containerumschlags und des Bahnbetriebs durchzuführen.

Das Gesamtziel wurde mit folgenden Teilzielen (Teilprojekten) erreicht, auf die im Folgenden eingegangen wird:

1. Teilziel „Infrastruktur“
2. Teilziel „Betriebsmittel“
3. Teilziel „Steuerung“

Eine ausführlichere Erläuterung der Zielstellung ist Kapitel 1.1 zu entnehmen. Versuchsstätte der Erprobung der Rangierlokomotive war dabei die Vorstellgruppe des Jade-Weser-Ports in Wilhelmshaven, wie in Abbildung 1 gezeigt.



Abbildung 1: Luftbild JadeWeserPort (Quelle: JWP)

2.1 Teilziel „Infrastruktur“

2.1.1 IST-Prozess

Zur Analyse der bestehenden Prozesskette (IST-Prozess) wurde in Arbeitspaket 2 ein detailliertes Visio-Flussdiagramm erstellt, das als Grundlage für die Entwicklung des SOLL-Prozesses diente. Der IST-Prozess wurde in mehrere Phasen unterteilt:

1. Eisenbahninfrastruktur-Nutzung
2. Disposition
3. Strecken-Einfahrt
4. Lok setzt um
5. Einfahrt ins Terminal X – Abstellung
6. Fortführung Lok-Umsetzung
7. Terminal Einfahrt – Abstellung
8. Lok-Abstellung in der Vorstellgruppe (VG)
9. Zugfertigmeldung
10. Einfahrt ins Terminal – Abholung
11. Einfahrt VG – Ausfahrt Terminal
12. Ausfahrt VG – Strecke

Diese Untergliederung wurde gewählt, um eine klare Strukturierung zu ermöglichen und die einzelnen Schritte des Prozesses besser zu verstehen. Sie erleichterte auch die Abgrenzung zum automatisierten Prozess (SOLL-Prozess, s. Kapitel 2.1.3). Darüber hinaus wurde bereits im bestehenden Prozess die Möglichkeit einer Zugtrennung berücksichtigt, da dies zu einem späteren Zeitpunkt erforderlich sein könnte.

Sowohl die Streckeneinfahrt als auch -ausfahrt wurden in den Prozess integriert, da im bestehenden Prozess die Rangierlok von einem Triebfahrzeugführer des jeweiligen Eisenbahnverkehrsunternehmens (EVU) geführt wird. Im weiteren Verlauf der Analyse hat die Projektgruppe die Prozessschritte identifiziert, die im automatisierten Prozess entfallen oder anders ausgeführt werden können. Basierend auf diesen Überlegungen wurde der SOLL-Prozess entwickelt.

2.1.2 Zielbild

Als Grundlage für die im Gesamtprojekt abzubildenden Funktionen wurde aus der erarbeiteten IST-Prozesskette ein Zielbild erstellt, s. Abbildung 2. Damit konnte der funktionale Ablauf des SOLL-Prozesses in der Systemarchitektur generiert werden.

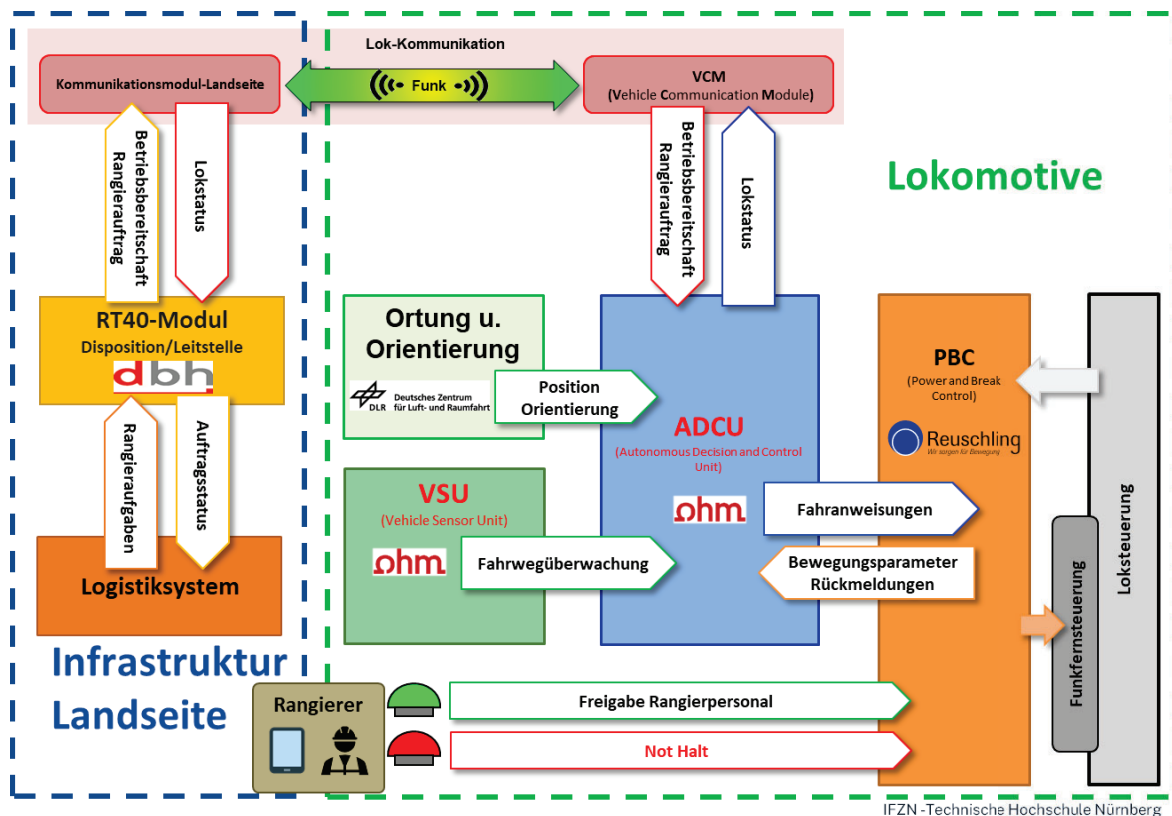


Abbildung 2: Zielbild

Mit Hilfe des RT40-Moduls werden die anstehenden Rangieraufgaben aus dem Logistiksystem eingelesen und auf Grundlage des in der Leitstelle dafür eingestellten Fahrwegs automatisch ein Rangierauftrag für die Lokomotive erstellt. Dieser wird anschließend über die Funk-Schnittstelle der Lokkommunikation an die ADCU auf der Lokomotive übermittelt. Die ADCU generiert daraus mit Hilfe der Daten aus Ortungs- und Orientierungsmodul, Fahrwegüberwachung und PBC Fahrplanweisungen für die PBC. Diese setzt die Fahrplanweisungen über die Schnittstelle der Funkfernsteuerung in Steuerbefehle für die Loksteuerung um und liefert Bewegungsparameter sowie Rückmeldungen der Steuerbefehle an die ADCU. Eine weitere Aufgabe der ADCU ist das kontinuierliche Absetzen von Statusmeldungen, mit denen die Infrastrukturseite z.B. über Position Tätigkeit oder besondere Ereignisse informiert wird. Für manuelle Tätigkeiten beim Rangieren, wie z.B. Kuppeln, Schlauchen, Wagenbremsen lösen, ist im Zielbild noch der Rangierer vorgesehen. Er ist über ein webbasiertes Tablet mit dem RT40-Modul verbunden, über das er auch seine Arbeitsaufträge erhält.

2.1.3 SOLL-Prozess

Aus Basis des identifizierten IST-Prozesses (s. Kapitel 2.1.1) sowie des anschließend erstellten Zielbildes (s. Kapitel 2.1.2) wurde ein SOLL-Prozess erstellt und visualisiert. Dieser ist den Anlagen 1 und 2 detailliert zu entnehmen und wird nachfolgend mit dem Schwerpunkt auf funktionale Abläufe in der Systemarchitektur beschrieben.

Funktionale Abläufe in der Systemarchitektur

Zweckmäßigerweise werden die funktionalen Abläufe anhand einer typischen planmäßigen Rangierfahrt erläutert (s. Abbildung 2).

Zwischen den Systemen Logistiksystem und Lokkommunikation bzw. nachfolgend der Lokomotive wird das RT40-Modul als Schnittstelle etabliert. Die wesentlichen Aufgaben des RT40-Moduls bestehen darin, einerseits aus anstehenden Rangieraufgaben des Logistiksystems Datensätze für die automatische Lokomotive zu generieren und andererseits Statusmeldungen der Lokomotive an die Infrastruktur-Seite weiterzuleiten.

Um die automatische Lokomotive zu aktivieren, muss sie zunächst durch den Vorbereitungsdienst bzw. den Rangierer in den Modus „Standby“ gebracht werden. Dazu werden alle für den automatischen Betrieb notwendigen Systeme gestartet. Die Lokomotive sendet jetzt kontinuierlich Statusmeldungen über die Lok-Kommunikation an das RT40-Modul. Die Meldungen beinhalten neben der Identifikationsnummer der Lokomotive die Koordinaten ihres Standortes und den Zustand der Betriebsbereitschaft (Standby bzw. Betriebsbereit). Damit ist die Lok für den Fahrdienstleiter (Fdl)/Disponent im RT40-Modul verfügbar.

Soll eine Lokomotive für eine Rangieraufgabe eingesetzt werden, muss sie vom Fdl aus dem Modus „Standby“ in den Modus „Betriebsbereit“ gebracht werden. Der Fdl wählt dann im RT40-Modul anhand der anstehenden Aufträge die nächste abzuarbeitende Rangieraufgabe und dazu eine dafür in Frage kommende automatische Lokomotive aus (das System ist so aufgestellt, dass in einem zukünftigen Szenario die Verwendung mehrerer automatischer Lokomotiven möglich ist).

Da aus sicherheitstechnischen Gründen eine Einbindung des Leitsystems noch nicht möglich war, muss der Fdl den Fahrweg vom Standort der Lok bis zum Ziel der Rangieraufgabe über das Leitsystem (Stellwerk) einstellen.

Anschließend werden die Fahrwegdaten in das RT40-Modul eingegeben, das dann daraus automatisch einen entsprechenden Datensatz erstellt und über die Lok-Kommunikation an die Lokomotive sendet.

Die **Autonomous Decision and Control Unit** ‚**ADCU**‘, an Bord der Lokomotive generiert daraus Steuerbefehle zur Ausführung der Rangieraufgabe. Dazu liefert das Ortungs- und Orientierungssystem Daten zum Standort der Lok und zur Orientierung, d.h. zur Ausrichtung im UTM-Koordinatensystem (**UTM - Universales Transversales Mercator-System**) an die ADCU. Für die Fahrwegüberwachung liefern die Vehicle Sensor Units (VSU) (s. Kapitel 2.2.7), die sich jeweils an den beiden Enden der Lok befinden, Daten über Objekte im Umfeld vor der Lokomotive. Schiebt die Lok einen Zug, so muss für das Fernziel der Vollautomatisierung für die Überwachung des Fahrwegs vor der geschobenen Einheit eine geeignete Umfeldüberwachungstechnologie entwickelt werden, die nicht im Rahmen des Projektes RangierTerminal 4.0 behandelt wurde. Für den Testbetrieb im Projekt Rangierterminal4.0 im JadeWeserPort übernimmt ein Rangierer auf der Zugspitze die Aufgabe der Fahrwegüberwachung für die geschobene Einheit. Die Steuerbefehle der ADCU werden in der Power and Break Control (PBC) (s. Kapitel 2.2.6) über eine entsprechende Schnittstelle zur Lok-Funkfernsteuerung umgesetzt.

Neben dem Bewegen der Lokomotive müssen für die automatisierte Ausführung von Rangieraufgaben auch Tätigkeiten des Rangierpersonals, wie Kuppeln, Schlauchen oder das Lösen der Bremse, in den Prozessablauf integriert werden. Dazu ist der Rangierer mit einem webbasierten Tablet ausgerüstet,

über das er mit dem RT40-Modul verbunden ist. Er erhält somit Arbeitsaufträge (Kuppeln, Schlauchen, etc....), die für die Durchführung der Rangieraufgaben erforderlich sind. Außerdem kann er darüber die Ausführung seiner Aufträge mit einer Freigabemeldung bestätigen.

Um die Sicherheit des Rangierpersonals beim Kuppeln und Schlauchen im Berner Raum oder beim Lösen der Bremse zu gewährleisten, wird vor Beginn dieser manuellen Tätigkeiten der Automatikmodus der Lokomotive deaktiviert. Nach Ausführung seiner Tätigkeiten muss der Rangierer zusätzlich über einen Freigabetaster seitlich an der Lok bestätigen, dass sich keine Person mehr im Gefahrenraum befindet und er seine Tätigkeiten beendet hat. Die Position des Freigabetasters stellt zusätzlich sicher, dass sich der Rangierer beim Betätigen außerhalb des Gefahrenbereichs aufhält.

Gleichzeitig aktiviert er den Automatikmodus und bestätigt für die Fortführung des Betriebsablaufs über die Freigabe, dass er seinen Arbeitsauftrag ausgeführt und abgeschlossen hat.

Über die Statusmeldungen der Lokomotive wird die Infrastruktur (RT40-Modul) auch über die aktuelle Tätigkeit der Lokomotive informiert. Gleichzeitig werden darüber aber auch Informationen über eine ausgeführte „Schnellbremsung“, ein Anhalten vor einem Hindernis, oder das Beenden eines Rangierauftrages übergeben.

Um auch den Optimierungszielen des Projektes hinsichtlich Lärm- und Schadstoffemissionen, sowie dem Energieverbrauch Rechnung zu tragen, besteht die Möglichkeit, die Lokomotive über das RT40-Modul in den Standby-Modus zu versetzen, wenn diese für einen längeren Zeitraum nicht eingesetzt werden soll.

Die Automatisierung der Rangierabläufe ermöglicht erst den Einsatz von Systemen zur Kraftstoffeinsparung (ECO-Modus). Die Integration des Logistiksystems in die Automatisierung macht die Abwicklung der Rangieraufgaben besser planbar und gestattet somit den Einsatz eines „ECO-Modus“ auf der Lokomotive. Der ECO-Modus kann durch den Fdl aktiviert werden. Dazu muss über das RT40-Modul die voraussichtliche Wartezeit bis zum nächsten Auftrag über die ADCU an die PBC gesendet werden. Dort kann auf der Grundlage der Betriebsparameter der Lok der ECO-Modus über eine Start-Stopp-Funktion umgesetzt werden. Durch die damit besser planbaren Einsatzzeiten können auch energiesparende Fahrstrategien angewandt und effizienter umgesetzt werden. Je nach zur Verfügung stehender Zeit für die jeweilige Rangieraufgabe kann eine energiesparende Fahrstrategie, wie geringere Geschwindigkeiten oder Ausrollen, zum Einsatz kommen. Je nach eingesetztem Antriebskonzept, führt dies auch zu einer deutlichen Lärmreduzierung im Rangierbetrieb.

Eingriffsmöglichkeiten

Im Rahmen des Forschungsprojektes lag die Verantwortung für Fahrzeugbewegungen beim Triebfahrzeugführer. Die Automatisierungsfunktionen wurden nicht im Sinne signaltechnisch sicherer Übertragung aufgebaut, dennoch sollte durch die Funktionalitäten das Szenario ohne Triebfahrzeugführer aufgezeigt werden. Die im folgenden beschriebenen Eingriffsmöglichkeiten zum Unterbrechen oder zum Abbrechen der automatisierten Rangieraufgabe und damit zum Anhalten der Lokomotive wurden umgesetzt.

Eingriffsmöglichkeiten durch den Fdl:

- Der Fdl hat die Möglichkeit, die Lokomotive entweder an einem bestimmten Streckenabschnitt oder an ihrer aktuellen Position anhalten zu lassen. In einer Notfallsituation kann der Fdl eine „Schnellbremsung“ der Lokomotive am RT40-Modul auslösen, die dann über die Lok-Kommunikation an den ADCU-Rechner weitergeleitet wird.

Eingriffsmöglichkeiten durch den Rangierer:

- Der Rangierer kann in einer Notfallsituation eine „Schnellbremsung“ der Lokomotive über sein Tablet, das mit dem RT40-Modul verbunden ist, auslösen. Der Befehl wird dann über die Lok-Kommunikation an den ADCU-Rechner weitergeleitet.

Eingriffsmöglichkeit durch den Triebfahrzeugführer:

- Im Rahmen des Testbetriebs hat der Triebfahrzeugführer über die konventionelle Loksteuerung jederzeit die Möglichkeit die Steuerung der Lokomotive zu übernehmen, und damit gleichzeitig den automatischen Betrieb zu beenden.

2.2 Teilziel „Betriebsmittel“

Die automatisierte Rangierlokomotive ist folgendermaßen aufgebaut:

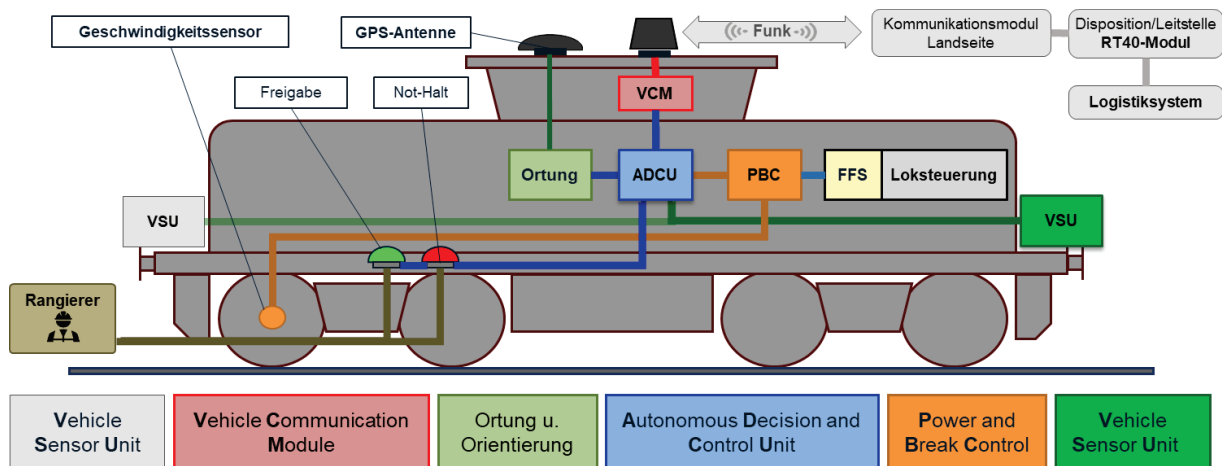


Abbildung 3: Aufbau Lokomotive, mit zusätzlich erforderlichen Modulen für ein automatisiertes Rangieren, Quelle: THN

2.2.1 RT40-Modul

Das „RT40-Modul“ fasst die organisatorischen und administrativen Softwarekomponenten zur Verwaltung automatisierter Rangieraufträge zusammen. Dies sind die Beschreibungen der beteiligten Lokomotiven, der Aufbau der Gleisstruktur und dessen Eigenschaften, der Aufbau bzw. die Verwaltung von Routen auf der Gleisstruktur, die Anlage bzw. die Verwaltung personeller Ressourcen (Rangierer/Fahrdienstleiter), der Aufbau von Rangieraufträgen unter Verwendung der Lokomotiven, Routen und Rangierer. Die Verwaltung von Rangieraufträgen bietet die Möglichkeit der zeitlichen Strukturierung der Ressourcen und der Steuerung sowie Ereignisverfolgung einzelner Rangieraufträge.

Darüber hinaus bietet das „RT40-Modul“ einen zusätzlichen möglichen Kommunikationskanal zwischen Fahrdienstleiter und Rangierer.

Die zentrale Aufgabe des RT40-Moduls ist die Abarbeitung von Rangieraufträgen (also das automatisierte Heranführen von Lokomotiven an Wagen und das Rangieren der Wagen auf der Gleisanlage). Ermöglicht wird dies u. a. durch eine Kartendarstellung des Stellwerkes mit Angaben zur Position der Lokomotive und deren Zustand („betriebsbereit“/„standby“/„angekuppelt“/„fahrend“ etc.) und der Darstellung der Route auf der Gleisanlage und damit des Ziels der Lokomotive bzw. des gesamten Zugs. Der Ablauf kann nachvollziehbar in der Kartenansicht eingesehen werden. Durch die Client-/Serverarchitektur ist der Benutzer via Browser mit dem RT40-Server verbunden, der die Nachrichten der Anwendung und dem Nachrichtenmittler „OSIS“ verwaltet. OSIS ist die Softwarekomponente zum Datenaustausch zwischen RT40-Modul und Lokomotive, welche in engen Intervallen Statusmeldungen (Position/Zustand) mitteilt.

Die technische Umsetzung erfordert die nachfolgenden Arbeitsschritte (vgl. auch Kapitel 2.3.1):

- Eine Auftragsverwaltung mit der Möglichkeit eines EXCEL-Uploads von Aufträgen
- Eine vollständige Dialog-Verwaltung für die Stammdaten (Lok, Firmen, Gleise, Strecken)
- Eine User-Verwaltung mit entsprechenden Berechtigungen
- Kommunikationstrecken für den Datenaustausch mit der Lok
- Eine graphische Abbildung des Gleisfeldes
- Eine zweite graphische Abbildung des Gleis-Testfeldes der Fa. Reuschling
- Einen Messenger-Dienst für die Kommunikation zwischen Fahrdienstleister und Rangierpersonal
- Ein Nothalt-Verwaltungsdialog
- Auftragsdialog für den Rangierer für ein mobiles Gerät

Im Rahmen des Projektes wurde ebenfalls eine „Web-Lösung RT40“ erstellt, die über die bei dbh eingesetzte Kommunikationsplattform OSIS (Open System Integration-Plattform) mit dem Kommunikations-Modul der Lok (Kommunikations-Modul Landseite der Fa. Reuschling) verbunden ist und die o.g. Funktionen beinhaltet.

2.2.2 Kommunikation zwischen Infrastruktur und Lokomotive

Für die bidirektionale Verbindung zwischen dem RT40-Modul und der Lokomotive wird das Vehicle Communication Module (VCM), technisch gelöst durch das System J.I.M. von Reuschling, genutzt. Dadurch können einerseits die Rangieraufträge zur Lokomotive geschickt werden, andererseits die Statusinformationen von der Lokomotive in das RT40-Modul übertragen werden. Für die Anwendung im Projekt wurde vor allem die Applikation auf dem J.I.M. Server angepasst, um die Rangieraufträge aus dem RT40-Modul in das korrekte Format für die ADCU umzuwandeln.

Die technische Architektur für die Übertragung wird in der folgenden Abbildung 4 dargestellt.

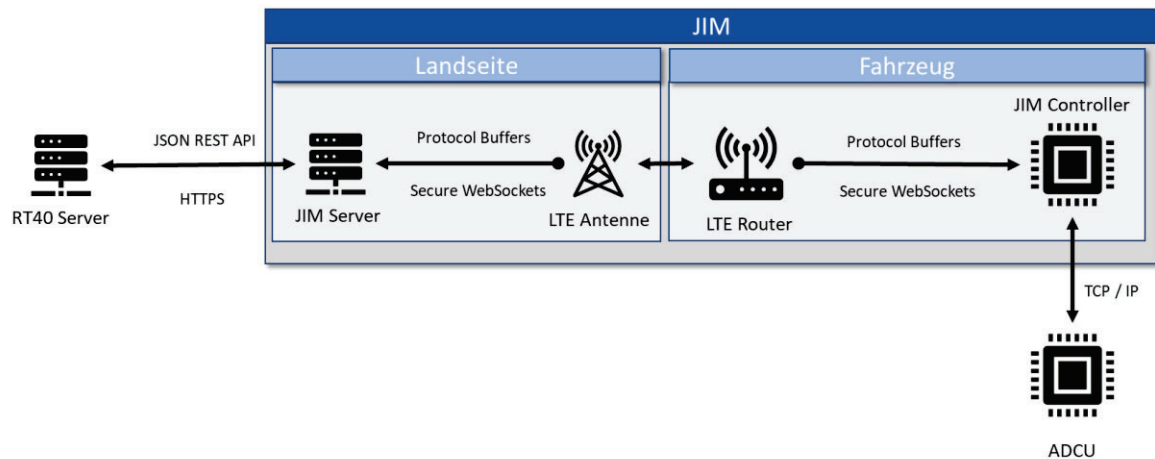


Abbildung 4: Kommunikationsarchitektur zwischen RT40-Modul und der Lokomotive

2.2.3 Ortung

Für die Bestimmung der Fahrzeugposition wurde im Projekt eine Ortungseinheit entworfen und genutzt. Die Ortungseinheit enthält die folgenden Komponenten:

- Eine inertielle Messeinheit (Inertial Measurement Unit, IMU) für die Messung von Fahrzeugbeschleunigungen und Drehraten. Die IMU liefert vergleichsweise hochfrequente Daten in der Größenordnung 100 Hz. Die Sensorik ist in Mikrosystemtechnik (MEMS) realisiert und dadurch günstig (Größenordnung 100 Euro). MEMS-IMU zeigen jedoch typische Offset- und Driftfehler in den Messungen, welche mithilfe von Algorithmen geschätzt werden müssen.
- Zwei Empfänger und Antennen für Satellitennavigation (Global Navigation Satellite Systems, GNSS). Die GNSS-Empfänger stellen Positions- und Geschwindigkeitsmessungen bereit. Die Rate ist deutlich geringer mit ca. 1 Hz. Die Nutzung von zwei Empfängern vereinfacht die Schätzung der Fahrzeugorientierung auf dem Gleis. Der Preis für die GNSS-Empfänger ist wiederum in der Größenordnung 100 Euro und damit im Low-Cost-Segment. Die Antennen sind mithilfe von Magnethalterungen am Fahrzeug befestigt.
- Als Rechentechnik wird ein handelsüblicher Kleinrechner genutzt (Single-Board-Computer, SBC). Komponenten sind überwiegend über USB verbunden. Für die Speicherung von Daten ist ein SSD-Speichermedium (Größe 1 TB) verbaut.
- Ein LTE-Modul ist für die Verbindung mit dem Internet verbaut und ermöglicht die Fernwartung der Einheit.
- Ein CAN-Modul ermöglicht Kommunikation mit der ADCU und den Empfang von Geschwindigkeitsinformationen. Weiterhin wird Ethernet für die Kommunikation genutzt.
- Für die Spannungsversorgung ist ein bahngeeignetes Netzteil verbaut, dass an das Bordnetz der Rangierlok angeschlossen werden kann. Für kurzfristige Unterbrechungen und ein kontrolliertes Herunterfahren nach Abschalten der Versorgung wird eine unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV) mit Batterie genutzt.



Abbildung 5: GNSS-Antennen der Ortungseinheit auf der Rangierlok.



Abbildung 6: Hardwarekomponenten (links) und Ortungseinheit (rechts) im Führerstand der Rangierlok.

Die Sensordaten können auf unterschiedliche Arten kombiniert werden, um Positionsinformationen zu berechnen. Besonders geeignet sind Methoden der Sensordatenfusion, insbesondere auf Basis von Kalman-Filtern (KF). Einige KF-Vorteile in diesem Zusammenhang sind:

- Ausgangsdaten mit konstanter Rate, unabhängig von Variationen in den einzelnen Sensorraten. Insbesondere Unterbrechungen im GNSS-Empfang können so überbrückt werden. Die KF-Datenrate orientiert sich in der Praxis an den Sensoren mit höheren Datenraten.
- Modularität: Die Einbindung weiterer Sensoren kann über die Ausführung weiterer KF Messupdates realisiert werden, ohne das bestehende KF zu verändern.
- Umgang mit Unsicherheiten: Alle Eingangs-, Ausgangs- und interne Größen im KF werden durch einen Mittelwert und eine Kovarianzmatrix beschrieben. Nutzer beschreiben die Unsicherheiten in den Bewegungs- und Messmodellen durch entsprechende Rausch-Kovarianzen, die sich aus dem Charakter des Fahrzeugs (mittleres Beschleunigungs- und Bremsverhalten) und den Sensoren (Datenblätter, Experimente) ableiten lassen.
- Robustheit: Fehler in den Kovarianz-Parametern, vereinfachte Modellierung in der Veränderung des KF-Zustandsvektors, unsichere Initialisierungen haben in der Praxis einen begrenzten Einfluss auf die Güte der Schätzung.

Weitere Details können den Veröffentlichungen (Roth, et.al, 2023) (Roth, et al., 2021) entnommen werden.

2.2.4 Steuerung ADCU

Für das Generieren der Steueranweisungen der automatisierten Lokomotive wurde die „Autonomous Decision and Control Unit“ (ADCU) entwickelt. Die ADCU basiert auf der Grundlage eines Matlab-Simulink-Modells, dass mit Hilfe einer speziell dazu konzipierten Simulationsumgebung entwickelt wurde. Das Matlab-Programm wurde in C-Code übersetzt und auf einem Prototyping-System (MicroAutoBox III' der Fa. dSPACE), das als Steuergerät fungiert, auf der Lok zum Einsatz gebracht. Dieses generiert auf Grundlage des vom RT40-Modul gesendeten Rangierauftrags die Fahrmanöver für die Lokomotive und übernimmt außerdem den Datenaustausch mit den Komponenten über die jeweiligen Schnittstellen. Mit Matlab-Simulink wurde außerdem eine Simulationsumgebung geschaffen, mit der das ADCU-Programm außerhalb der Lokomotive entwickelt und getestet werden kann.

Die ADCU beinhaltet zwei Kernkomponenten. Für die Berechnung der Hindernisrelevanz wird zum jeweils aktuellen Rangierauftrag einer virtuellen Karte generiert. Dazu wird aus den Geodaten des Datensatzes der Fahrweg der Lokomotive in eine virtuelle Karte übertragen. Über das Ortungssystem kann die Position der Lokomotive auf dem virtuellen Fahrweg bestimmt werden. Mit den Daten der VSU können auch Objekte, die durch die Sensorik vor der Lok detektiert wurden, in die virtuelle Karte eingetragen werden. Mit Hilfe der PBC-Daten zur aktuellen Geschwindigkeit und der Zugkonstellation aus dem Rangierauftrag, kann der für die Überwachung relevante Anhalteweg ermittelt, und daraus schließlich die Hindernisrelevanz berechnet werden.

Die zweite Kernkomponente ist die Steuerung von Traktion und Wegzielbremsung bzw. Weg- und Geschwindigkeitszielbremsung. Dazu wird zunächst mit Hilfe der Zugeigenschaften aus dem Rangierauftrag wie z. B. Zugmasse und Zuglänge eine Kalkulation des Anhaltewegs und der dazu erforderlichen Bremsstufe aus der aktuell gefahrenen Geschwindigkeit ermittelt, um den Bremsbeginn festlegen zu können (s. Abbildung 7). Ausgehend von den Daten aus der Bremskalkulation erfolgt dann die Initialisierung des eigentlichen Bremsvorgangs. Dazu übermittelt die ADCU eine Geschwindigkeitsänderung in Form von „Soll-Geschwindigkeit“ und „Soll-Weg“ an die PBC. Die „Soll-Geschwindigkeit“ gibt die neue einzuregelnde Geschwindigkeit an, der zeitliche Verlauf des „Soll-Wegs“ den dafür vorgesehenen Weg. Während des Bremsvorgangs wird bis zum Erreichen der neuen „Soll-Geschwindigkeit“ der noch verbleibende Weg angegeben. Dieses Verfahren wird analog auch für das Beschleunigen angewendet.

Die Überwachung des Fahrwegs wurde folgendermaßen umgesetzt:

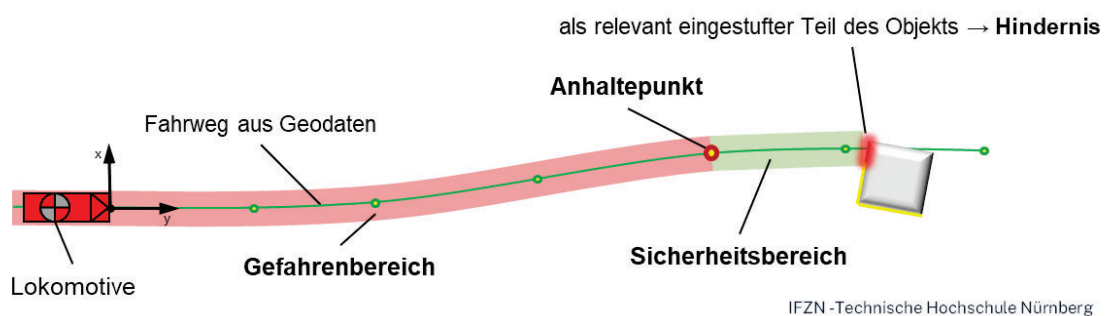


Abbildung 7: Kalkulation Anhalteweg

Zunächst wurden Bremskurven, d. h. Anhaltewege der Lokomotive aus verschiedenen Geschwindigkeiten ermittelt zwischen denen interpoliert werden kann.

Auf dieser Grundlage wird dann für die jeweils aktuelle Geschwindigkeit der Anhalteweg kalkuliert.

Anhalten am Streckenende

Die ADCU initialisiert das „Bremsen am Streckenende“, sobald beim Ausführen eines Rangierauftrags der Anhaltepunkt auf den letzten Streckenabschnittspunkt des Fahrwegs trifft.

Anhalten am Hindernis

Die ADCU initialisiert das „Bremsen am Hindernis“, sobald beim Ausführen eines Rangierauftrags ein durch die VSU ermitteltes Hindernis von vorne in den Sicherheitsbereich eintritt.

Schnellbremsung (Not-Halt)

Die ADCU initialisiert eine Schnellbremsung (Not-Halt) sobald ein durch die VSU ermitteltes Hindernis an einer beliebigen Stelle seitlich in den Sicherheitsbereich oder Gefahrenbereich eintritt.

2.2.5 Funktionsabläufe

Um alle anfallenden Rangieraufgaben ausführen zu können, müssen verschiedene Funktionsabläufe automatisiert werden.

Ausführen eines Rangierauftrags



Abbildung 8: Ausführen eines Rangierauftrags

Nachdem der Vorbereitungsdienst die Lokomotive in den Modus „Standby“ gebracht hat, setzt sie Statusmeldungen ab und kann dann in den Modus „Betriebsbereit“ gebracht werden um Rangieraufträge ausführen zu können. Nach dem Empfang eines Rangierauftrags wird der Automatikmodus durch die ADCU aktiviert und die Lok führt den Rangierauftrag aus. Am Ziel des Rangierauftrags deaktiviert die ADCU den Automatikmodus und setzt über den Lokstatus die Fertigmeldung an das RT40-Modul ab (s. Abbildung 8).

Durchführen von Rangieraufträgen mit Rangierkupplung (RK900)

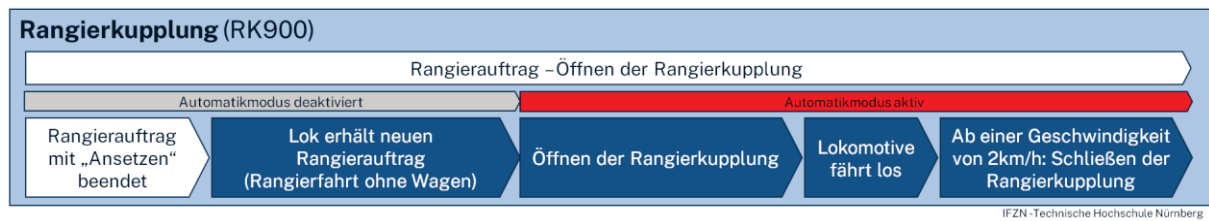


Abbildung 9: Durchführen von Rangieraufträgen mit Rangierkupplung

Um Rangieraufträge mit der Rangierkupplung RK900 sicher durchführen zu können, wird immer, wenn die ADCU einen Rangierauftrag für eine Rangierfahrt „ohne Wagen“ erhält, die Rangierkupplung geöffnet und ab einer Geschwindigkeit von 2 km/h wieder geschlossen. Bei Rangieraufträgen „mit Wagen“ entfällt dementsprechend der Befehl zum Öffnen (s. Abbildung 9).

Verhalten beim Detektieren von Hindernissen



Abbildung 10: Verhalten beim Detektieren von Hindernissen

Wird im laufenden Rangierauftrag durch die VSU ein Hindernis detektiert, so wird beim Erreichen des errechneten Bremspunktes das „Bremsen vor einem Hindernis“ initialisiert. Die Lokomotive bleibt in einem Sicherheitsabstand vor dem Hindernis stehen, woraufhin die ADCU den Rangierauftrag abbricht und den Automatikmodus deaktiviert. Anschließend geht die Lokomotive in den „Standby-Modus“ und die ADCU setzt über den Lokstatus die Meldung „Halt Hindernis“ an das RT40-Modul ab. Nachdem der Fdl die Situation geklärt hat, muss er die Lok mit der speziellen Anfrage zur „Betriebsbereitschaft nach Halt / Not-Halt-Hindernis“ wieder in den Modus „Betriebsbereit“ bringen. Die ADCU erwartet danach immer einen neuen Rangierauftrag (s. Abbildung 10).

Rangierauftrag mit Ansetzen

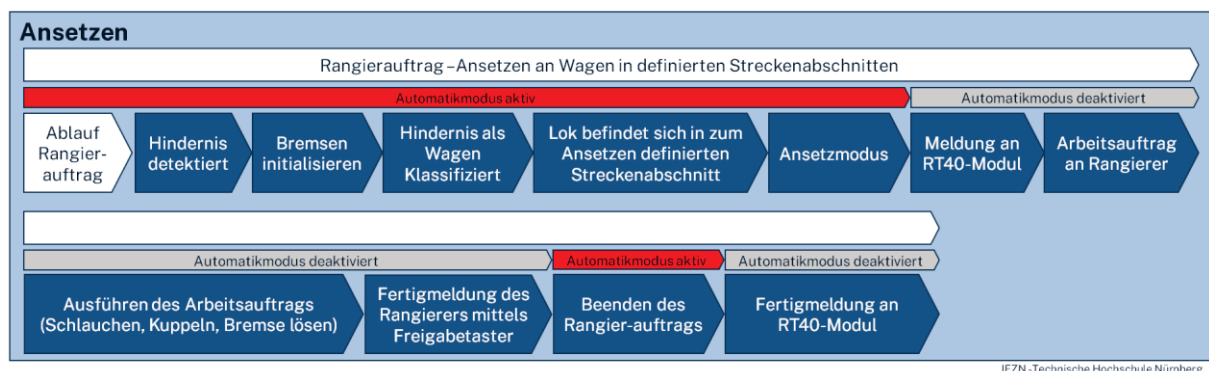


Abbildung 11: Rangierauftrag mit Ansetzen

Um das Ansetzen an Wagen oder Wagengruppen sicher durchführen zu können, wurde folgender Funktionsablauf generiert. Im laufenden Rangierauftrag wird der Wagen, auf Grund der noch relativ großen Entfernung, zunächst als Hindernis über die VSU detektiert. Daraufhin wird das „Bremsen vor einem Hindernis“ initialisiert. Während des Bremsvorgangs kann beim Näherkommen das Hindernis dann als Wagen klassifiziert werden. Befindet sich der Wagen dann in einem durch den Rangierauftrag zum Ansetzen definierten Streckenabschnitt, so wird der Ansetzmodus aktiviert. Die Lokomotive verzögert auf Ansetzgeschwindigkeit. Kurz vor dem Pufferkontakt wird dann durch die ADCU eine Geschwindigkeitsänderung auf 0 km/h an die PBC weitergegeben. Der Stillstand der Lokomotive beendet den Ansetzmodus, die ADCU deaktiviert den Automatikmodus und setzt eine Meldung an das RT40-Modul ab. Daraufhin bekommt der Rangierer seinen Arbeitsauftrag und führt ihn aus. Die Bremsen werden gelöst ggf. wird gekuppelt und geschlaucht. Nach dem der Rangierer seine Arbeiten ausgeführt und den Gefahrenbereich wieder verlassen hat, setzt er seine Fertigmeldung mittels des Freigabetasters ab. Die ADCU aktiviert den Automatikmodus und setzt über den Lokstatus die Fertigmeldung an das RT40-Modul ab (s. Abbildung 11).

2.2.6 Steuerung PBC

Für die Leistungs- und Bremsregelung der Lokomotive wurde im Rahmen von Arbeitspaket 3 die **PBC** (Power and Brake Control) entwickelt. Sie dient der Übersetzung der Fahrbefehle der ADCU in konkrete Steueranweisungen für den Beschleunigungs- und den Bremsvorgang. Um einen sicheren Betrieb zu ermöglichen wurde die Lokomotive über die Schnittstelle der Funkfernsteuerung (FFS) gesteuert. Dies hat den Vorteil, dass eine sichere Rückfallebene existiert, z.B. für den Schleudergleitschutz, die Getriebesteuerung oder die Not-Halt-Kette existiert. Die PBC wurde hardwareseitig als Sicherheits-SPS von Siemens für die Anforderungen aus der DIN EN 50155 und 50129 entwickelt, sodass sie für den Eisenbahnbetrieb potenziell zulassungsfähig ist. Die Softwareentwicklung orientiert sich an der DIN EN 50657, sodass auch diese einem zulassungsfähigen Niveau entspricht. Die Statusinformationen der Lokomotive werden rückwirkungsfrei eingelesen, sodass einerseits zulassungstechnisch keine Probleme entstehen und andererseits Informationen über die Geschwindigkeit, die Betriebsdrücke und die Motordaten zur Verfügung stehen. Die Leistung der Lokomotive wird über sogenannte Leistungsstufen gesteuert, indem die Drehzahl des Motors stufenweise erhöht oder reduziert wird. Hierdurch ist eine Regelung der Geschwindigkeit auf die Vorgabe der ADCU möglich. In Abhängigkeit des vorgegebenen Bremsweges konnte mit Hilfe der Informationen über die aktuelle Geschwindigkeit, den Restweg und den Bremszylinderdruck ein entsprechender Bremsvorgang gesteuert werden.

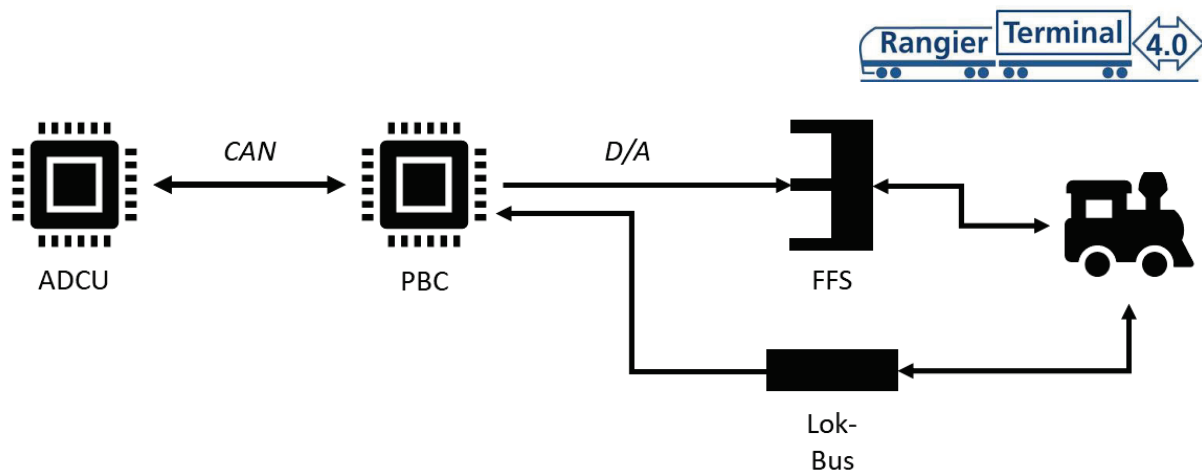


Abbildung 12: Kommunikationsarchitektur zwischen ADCU, PBC und Loksteuerung

Die Statusinformationen der Lokomotive werden rückwirkungsfrei eingelesen, sodass einerseits zulassungstechnisch keine Probleme entstehen und andererseits Informationen über die Geschwindigkeit, die Betriebsdrücke und die Motordaten zur Verfügung stehen. Die Leistung der Lokomotive wird über sogenannte Leistungsstufen gesteuert, indem die Drehzahl des Motors stufenweise erhöht oder reduziert wird. Hierdurch ist eine Regelung der Geschwindigkeit auf die Vorgabe der ADCU möglich. In Abhängigkeit des vorgegebenen Bremsweges konnte mit Hilfe der Informationen über die aktuelle Geschwindigkeit, den Restweg und den Bremszylinderdruck ein entsprechender Bremsvorgang gesteuert werden. In Abbildung 13 ist die geplante Regelstrecke der PBC zu sehen.

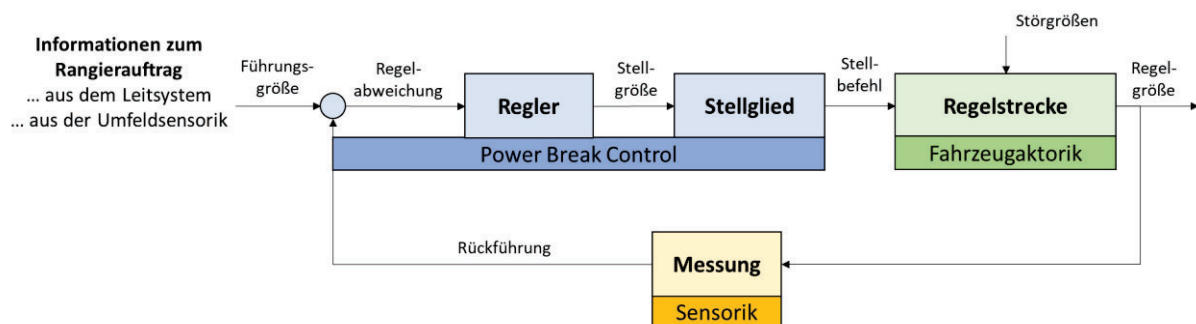


Abbildung 13: Regelstrecke der PBC

2.2.7 Sensorik

In Arbeitspaket 3 wurde für die Umfelderkennung der Lokomotive eine **Vehicle Sensor Unit ,VSU'** entwickelt, s. Abbildung 14. Deren Sensorik zur Fahrwegüberwachung wurde ausgehend von typischen Anhaltewegen mit den zu erwartenden Zug-Konstellationen und hinsichtlich der Performance, aber auch der Robustheit und Integrierbarkeit ausgewählt.

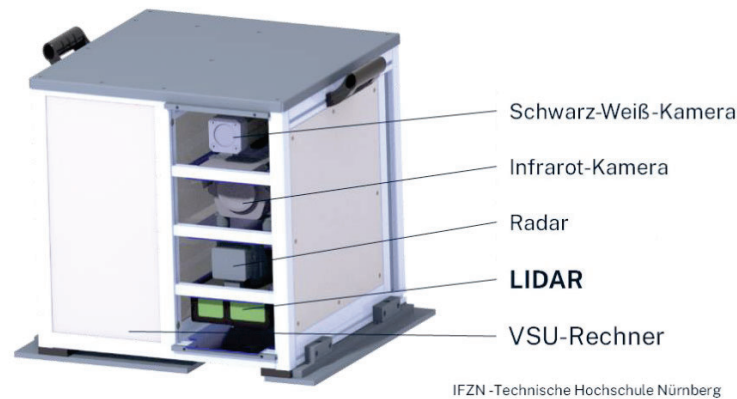


Abbildung 14: VSU - Vehicle Sensor Unit

Als Anforderung wurde folgendes festgelegt:

- Maximaler Anhalteweg: 100m
 - Überwachung des Lichtraumprofils bei max. Anhalteweg und min. Gleisbogenradius
 - Erkennen von Objekten mit der Ausdehnung von 0,5m x 0,5m im überwachten Lichtraumprofil
- Auf Grundlage dieser Anforderungen kam der Sensor „4Sight M“ der Firma „Aeye“ zum Einsatz.



Field of View:	60° x 30°
Range:	205m @ 10% reflectivity
Max Range:	300m (customizable to 1000m)
Update Rate:	10Hz to 100Hz
Used Scan Pattern:	Long_Range_Urban_Driving
Resolution:	0.1° (v) x 0.1° (h)

Abbildung 15: LiDAR 4Sight M

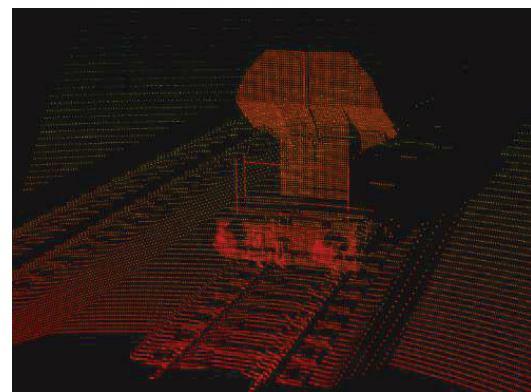


Abbildung 16: LiDAR-Punktwolke

Die Umfelderkennung wurde mit ‚ROS‘ **R**obot **O**perating **S**ystem als Middleware zwischen Sensor, Objekterkennung und der ADCU auf einem in der VSU integrierten Rechner umgesetzt und ist über eine Ethernet-Schnittstelle mit der ADCU verbunden. Für die Objekterkennung wird zunächst die aus den Rohdaten erzeugte Punktwolke mittels eines „Voxel Filters“ komprimiert, sortiert und anschließend zu Clustern, die den Objekten entsprechen, zusammengefasst. Aus den Clustern werden dann sog. „Bounding Boxes“ (minimaler Begrenzungsrahmen der Punktemenge des Objekts) erzeugt und in einer Objektliste zusammengestellt, die dann an die ADCU zur Auswertung weitergegeben werden kann.

Zu den Anforderungen an eine automatisierte Lokomotive gehört auch das Ansetzen an einen Wagen oder eine Wagengruppe. Dazu ist es notwendig, einen Wagen als solchen zu klassifizieren. Als Klassifizierungsmerkmal wurde dazu die Pufferbohle herangezogen. Sobald sich Bounding Boxes mit

den für eine Pufferbohle typischen Abmessungen und an der dafür entsprechenden Position vor der Lokomotive lokalisieren lassen, wird das Objekt in der Objektliste als Wagen klassifiziert.

2.2.8 Funktionsprüfung der Komponenten und Integrationstest des Zusammenwirkens

Bei der Funktionsprüfung der Komponenten (Arbeitspaket 5) wurde vor allem das Zusammenwirken von Fahrzeugsteuerung, Umfelderkennung und Ortung getestet. Die einzelnen Funktionen der Fahrzeugsteuerungskomponente ADCU wurden dabei zunächst in der im AP3 entwickelten Simulationsumgebung geprüft und verifiziert. Dazu sind verschiedene Fahrsituationen, wie z.B. Zielbremsung, Ansetzen an einen Wagen oder Not-Halt simuliert und verifiziert worden. Anschließend konnten bereits auf dem Werksgleis der Fa. Reuschling in Hattingen erste Systemtests in einem realen Testfeld durchgeführt werden. Bei diesen Tests konnten sowohl verschiedene Fahrsituationen wie z.B. das Beschleunigen auf eine Sollgeschwindigkeit oder die Zielbremsung, als auch das Umsetzen von Rangieraufträgen aus dem RT40-Modul getestet werden.

Die ersten Funktionsprüfungen der Umfelderkennung sind zunächst mit Hilfe von Sensordaten, die bei Messfahrten u. a. im JWP aufgenommen wurden, durchgeführt worden. Danach konnte sowohl die Umfelderkennung selbst, als auch die Reaktion der ADCU auf erkannte Hindernisse in einer speziellen Simulationsumgebung getestet werden. Diese Simulationsumgebung, die in einem anderen Forschungsprojekt der THN (VAL) entwickelt wurde, ist in der Lage, Sensordaten aus einer virtuellen Umgebung zu generieren und dem realen VSU-System zur Auswertung zur Verfügung zu stellen.

2.3 Teilziel „Steuerung“

2.3.1 Integration der IT-Systeme

Im Folgenden werden die Details und grundlegende Eckpunkte zur Kommunikation der einzelnen Module untereinander auf technischer Ebene detailliert beschrieben. Der Einsatz modernster Technologien bietet ein großes Spektrum für Nutzung der Systeme bei unterschiedlichen Umgebungsbedingungen.

2.3.1.1 Systemumgebung und technische Anbindung

Die serverseitige Umsetzung erfolgt mit Hilfe der Frameworks Springboot, VAADIN in einem Wildfly-Container in einer Java-Anwendung. Dadurch ist die clientseitige Anbindung des Browsers gewährleistet. Momentan sind keine Einschränkungen bei den Browser-Typen (Firefox etc.) bekannt. Die https-Anbindung erfolgt über eine öffentliche https-Adresse bis zur Firewall. Hinter der öffentlichen https-Adresse verbirgt sich eine interne http-Adresse ohne SSL-Verschlüsselung. Somit wird dbh-intern kein Re-Routing erforderlich.

Die Authentifizierung für die http-Requests erfolgt intern und auch extern über eine Basic-Authentifizierung (User und Password), das OSIS-Kommunikationsmodul erhält eine http-Quittung. Genutzt wird als Datenbank aktuell für RT40 eine MariaDB. Es können auch andere Datenbanken eingesetzt werden z.B. eine MySQL-Datenbank.

2.3.1.2 Kommunikation und Formate

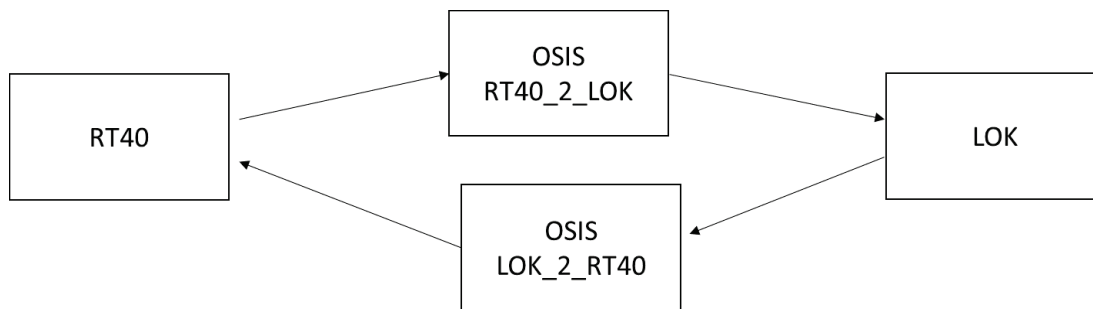


Abbildung 17: Kommunikation zwischen WEB-Anwendung RT40 und LOK

Die Kommunikation zwischen der WEB-Anwendung RT40 und der LOK (Kommunikationsmodul-landseitig) erfolgt über die bei dbh eingesetzte Kommunikationsplattform OSIS (Open System Integration Server):

- Die Kommunikation **von RT40 zur LOK** erfolgt über die OSIS-Prozess-Strecke RT40_2_LOK. Eingang per http und Format XML- Ausgang per https und Format JSON
- Die Kommunikation **von LOK zum RT40** erfolgt über die OSIS-Prozess-Strecke LOK_2_RT40. Eingang per https und Format JSON - Ausgang per http und Format XML

Für den Datentransport dbh-intern - also zwischen RT40 und OSIS - wird ein Meta-Header verwendet, der die folgenden Informationen enthält und dadurch die spätere Betreuung durch ein Support-Team erleichtern soll:

- Nachrichtentyp, OSIS-Auftragsnummer, Strecken-Namen.

2.3.2 Schnittstellen zwischen Bahnbetrieb und Containerumschlag

Die Schnittstellen zwischen dem Bahnbetrieb und dem Containerumschlag spielen eine entscheidende Rolle für einen effizienten und reibungslosen Güterverkehrstransport per Bahn. Diese Schnittstellen bilden die Verbindungspunkte, an denen der reibungslose Übergang von der Zugbewegung auf den Schienen hin zum Be- und Entladen der Container stattfindet. Ein fundiertes Verständnis dieser Schnittstellen war daher für die Durchführung des Projektes von entscheidender Bedeutung.

Im Bahnbetrieb sind die wichtigsten Schnittstellen die Gleisanschlüsse oder Terminalgleise, die speziell für den Containerumschlag ausgelegt sind. Hier treffen die Güterzüge ein, um beladen oder entladen zu werden. Diese Gleise müssen entsprechend dimensioniert und ausgerüstet sein, um den problemlosen Ablauf des Umschlagprozesses zu gewährleisten. Zudem müssen sie an das übergeordnete Schienennetz angeschlossen sein, um den Weitertransport der Container zu ermöglichen.

Auf der Seite des Containerumschlags bilden die Schnittstellen die verschiedenen Umschlageinrichtungen. Diese sind für das effiziente Be- und Entladen der Container verantwortlich und müssen nahtlos mit in den Bahnbetrieb integriert sein. Dies erfordert eine enge Abstimmung der Abläufe zwischen dem Bahnbetrieb und dem Containerumschlag, um Engpässe oder Verzögerungen zu vermeiden.

Darüber hinaus spielen auch die IT-Systeme eine wichtige Rolle als Schnittstelle zwischen Bahnbetrieb und Containerumschlag. Diese Systeme ermöglichen eine effiziente Steuerung und Überwachung des gesamten Logistikprozesses, angefangen von der Ankunft des Zuges bis hin zur Abfahrt der beladenen Container. Eine nahtlose Integration und interoperable Kommunikation zwischen den verschiedenen IT-Systemen war und ist daher unerlässlich, um einen effizienten automatisierten Betrieb sicherzustellen. Insgesamt sind die Schnittstellen zwischen Bahnbetrieb und Containerumschlag von zentraler Bedeutung für die Effizienz und Wettbewerbsfähigkeit des kombinierten Verkehrs. Eine enge Zusammenarbeit und eine durchdachte Planung der Abläufe an diesen Schnittstellen sind daher unerlässlich, um einen effizienten Gütertransport per Bahn zu gewährleisten.

Insgesamt erforderte die Automatisierung der Zustellung von Zügen ins Terminal aus der Vorstellgruppe des JadeWeserPorts eine ganzheitliche und zukunftsorientierte Herangehensweise, die die Besonderheiten des Terminals sowie die Anforderungen an Nachhaltigkeit und Effizienz berücksichtigt. Nur durch innovative Technologien, enge Zusammenarbeit und detaillierte Planung kann ein erfolgreicher, nachhaltiger und automatisierter Betrieb gewährleistet werden.

2.3.3 Optimierung der Prozessabläufe

Vor dem Hintergrund der genannten Informationen stellte die Optimierung der Prozessabläufe durch einen automatisierten Rangierbetrieb von der Vorstellgruppe des JadeWeserPorts ins Terminal eine zentrale Herausforderung dar. Insbesondere die Tatsache, dass viele Terminals aufgrund des vertikalen Umschlags keine Oberleitungen aufwiesen, erforderte innovative Lösungsansätze, um einen effizienten und nachhaltigen Güterverkehr zu gewährleisten.

Die Implementierung eines automatisierten Rangierbetriebs bot hier beträchtliches Potenzial zur Verbesserung der Prozessabläufe. Durch die Automatisierung konnten Zeit- und Energieeffizienz gesteigert sowie menschliche Fehler minimiert werden. Ein automatisiertes Rangiersystem konnte beispielsweise die Lokomotive von der Vorstellgruppe zum Terminal führen und dort die Rangieraufgaben selbstständig übernehmen.

Die Integration von Automatisierungstechnologien wie automatisierten Führungssystemen, Sensoren und Überwachungssystemen ermöglichte es, den Rangierprozess effizient zu steuern und zu überwachen. Durch eine präzise und zuverlässige Navigation konnte die Sicherheit im Betrieb gewährleistet werden.

Eine erfolgreiche Umsetzung erforderte jedoch eine enge Zusammenarbeit zwischen den verschiedenen Stakeholdern: Gemeinsam mussten die spezifischen Anforderungen und Herausforderungen identifiziert und geeignete Lösungen entwickelt werden, um einen reibungslosen und effizienten Rangierbetrieb zu gewährleisten. Dabei galt es insbesondere, bislang separat laufende Systeme durch das Schaffen von Schnittstellen in eine nahtlose Prozesskette zu integrieren (s. Kapitel 2.3.1)

Darüber hinaus war eine kontinuierliche Evaluierung der Prozesse erforderlich, um mit den sich wandelnden Anforderungen Schritt zu halten. Insgesamt bot die Optimierung der Prozessabläufe durch einen automatisierten Rangierbetrieb von der Vorstellgruppe des JadeWeserPorts ins Terminal ein

enormes Potenzial zur Steigerung der Effizienz, Sicherheit und Nachhaltigkeit im Güterverkehr. Durch eine ganzheitliche und zukunftsorientierte Herangehensweise konnten die Herausforderungen gemeistert und die Chancen dieser innovativen Technologien optimal genutzt werden.

2.3.4 Datenaufzeichnung: Potential für Bewegungsmodelle in der Eisenbahnbetriebssimulation

Die Simulationssoftware SUMO (Simulation of Urban Mobility) ist eine open-source Mobilitätssimulation, die am DLR-Institut für Verkehrssystemtechnik in Berlin entwickelt wurde und stetig weiterentwickelt wird (Alvarez Lopez, et al., 2018). Ursprünglich für die Modellierung des motorisierten Individualverkehrs (MIV) entwickelt, deckt sie aufgrund ihres agentenbasierten Ansatzes, der mikroskopischen Abbildungsebene und nicht zuletzt der Nutzung durch eine weltweite Community inzwischen eine Vielzahl von Verkehrsträgern und -mitteln ab. Dabei führt der multi- bzw. intermodale Ansatz des Simulators sowie die dezidierte Abbildung von Güterströmen durch entsprechende Agenten auch zu einer guten Eignung der Abbildung des Schienengüterverkehrs. Entsprechende Modelle werden meist mit dem Ziel erstellt, eine Wirkungsabschätzung bestimmter Szenarien oder Maßnahmen im eisenbahnbetrieblichen Kontext zu treffen, bspw. Veränderungen an der Infrastruktur, des Güterstromes oder technischer Eigenschaften.

Gerade im unmittelbar operativen Kontext spielen dabei fahrdynamische Eigenschaften der Simulationsagenten eine wichtige Rolle: erst ein möglichst realistisches Bewegungsverhalten ermöglicht eine genau Aussage zur Interaktion von Simulationsagenten und somit – im eisenbahnbetrieblichen Kontext – eine präzise Bewertung von Zugkonflikten, Verspätungsverhalten oder kapazitiven Fragestellungen. Der Schluss liegt nahe, dass ein so gestaltetes, realistisches Bewegungsverhalten zwar annäherungsweise auf mathematischen Annahmen und Modellierung fußen kann, durch den Miteinbezug von Realdaten jedoch verbessert werden könnte. Dies ermöglicht einen „Brückenschlag“ zum hier durchgeführten Forschungsprojekt RangierTerminal4.0., bei dem der Einsatz einer Ortungseinheit nicht nur die autonome Fahrfunktion stützt, sondern darüber hinaus auch eine große Anzahl an Bewegungsdaten einer Rangierfahrt aufzeichnet (Arbeitspaket 9, s. u.). Das Potential der eingesetzten Technik geht also über die Bereitstellung des Live-Standorts hinaus und wirft die Frage auf, inwiefern anfallende Daten auch zur Verbesserung des Bewegungsverhaltens in der Simulation beitragen können.

Dazu wird nachfolgend die Wirkweise des Bewegungsmodells von Zügen in SUMO skizziert: die Zugsbewegung zeigt im Wesentlichen eine Abhängigkeit vom hinterlegten sog. Zugkraft-Geschwindigkeits-Diagramm, das einem in Abschnitte unterteilten Geschwindigkeitsspektrum jeweils eine maximale dem Zug zur Verfügung stehende Zugkraft zuweist. Diese Modellierung ist auch in kommerziellen Eisenbahnbetriebssimulationen (z. B. RailSys, Open Track) gängig. Daneben erfolgt eine Modellierung des Widerstandes, dem der Zug unterliegt, bspw. des Luftwiderstandes oder des Rad-Schiene-Kontaktes. Aus der maximalen Zugkraft und dem Widerstand ergibt sich die Traktionskraft des Zuges. Wird weiter die Masse des Zuges berücksichtigt, ergibt sich je Simulationszeitschritt die resultierende Beschleunigung des Zuges, die letztlich sein Fahrverhalten steuert. Dabei unterliegt die Modellierung üblicherweise der Annahme von Maximalwerten, d. h. es werden maximale technisch

mögliche Werte hinterlegt und benutzt. Wenn nun reale Bewegungsdaten zur Verbesserung der Modelle hinzugezogen würden, so würden sich Beschleunigungsdaten als direkter Input für die entsprechende Simulation eignen. Diese könnten, unter Einbezug der Masse des Zuges, die entsprechend wirkenden Kräfte und Widerstände bedingen und so die zugrundeliegenden Modelle (s. o.) ändern. Dabei gilt es zu beachten, dass die Zugbewegung dann womöglich nicht mehr der technisch maximal möglichen Beschleunigung bzw. Geschwindigkeit entspricht (vermutlich wurde bei der Datenaufzeichnung zumindest zeitweise nicht nach technisch maximal möglicher Weise gefahren). Je nach aufgezeichneten Fahrregimen kann aus den Daten zum einen eine Validierung der maximalen Beschleunigung erfolgen und zum anderen kann ein neues Fahrregime für die Simulation abgeleitet werden, das einem in der Realität aufgezeichneten Fahrverhalten näher kommt. Nachfolgend wird dargelegt, inwiefern Beschleunigungsdaten durch die Ortungsdaten aufgezeichnet und bereitgestellt werden können.

Im Rahmen von Rangierterminal 4.0 wurde eine Sensoreinheit mit Ortungsalgorithmen eingesetzt. Neben den Fahrzeugpositionen werden immer andere Bewegungsgrößen (z. B. Geschwindigkeiten, Beschleunigungen) als Nebenprodukte geschätzt. Im Folgenden wird die eingesetzte Algorithmik (Sensordatenfusion, Kalman Filter) kurz erläutert und gezeigt, wie die für die Modellierung besonders relevante Fahrzeugbeschleunigung möglichst genau geschätzt werden kann, ohne weitere Eingangsdaten zu erheben. Zunächst ist ein Blick auf die Komponenten (Sensoren und Systeme) der Ortungseinheit sinnvoll:

Empfänger und Antennen für Satellitennavigation (global navigation satellite systems, GNSS, beispielsweise GPS und Galileo) empfangen Satellitensignale und errechnen intern Positionen und Geschwindigkeiten. Vereinfacht gesprochen wird die Position aus den Laufzeit-Messungen (Pseudo-Range) mehrerer Satelliten errechnet, die Geschwindigkeiten (Absolutwert) aus den Frequenzverschiebungen der Trägersignale (Doppler). GNSS liefert Daten mit üblichen Raten von 1 Hz. GNSS ist aus mehreren Gründen als System eher als Sensor zu bezeichnen. Ein GNSS-Empfänger benötigt immer eine Antenne. Die Signale werden von Satelliten gesendet und es werden immer Informationen über die Position dieser benötigt. Intern werden Algorithmen eingesetzt (oft Kalman Filter), welche die einzelnen Satellitensignale fusionieren. GNSS als „Sensor“ würde nur die Rohdaten (Doppler, Phasenverschiebung, Pseudo-Range) für die empfangenen Satelliten weiterreichen.

Inertiale Messeinheiten (inertial measurement units, IMU) werden für die Erfassung von Beschleunigungen und Drehraten genutzt. Gemessen wird im Koordinatensystem der IMU, oft in 3D. IMU-Messungen von weiteren Größen (Magnetfeld, Druck, Temperatur) sind üblich, jedoch hier nicht näher beleuchtet. Die IMU-Sensorik bietet höhere Datenraten, 100 Hz sind typischerweise erreichbar. Aufgrund der Machart (Mikrosystemtechnik, MEMS) haben IMU-Beschleunigungen und -Drehraten typische Offset- oder Bias-Fehler. Diese variieren langsam mit der Zeit und müssen geschätzt werden. Aus IMU-Daten lassen sich durch Integration (strapdown inertial navigation) Geschwindigkeiten und Positionen errechnen. Die Offset-Fehler führen jedoch zu schnell wachsenden Schätzfehlern (linear in der Geschwindigkeit, quadratisch in der Position), weshalb dies nur für kurze Zeitintervalle funktioniert.

Es ist deutlich, dass eine Fusion der Daten notwendig ist. So können die „absoluten jedoch niederfrequenten“ GNSS-Daten mit den „hochfrequenten jedoch driftenden“ IMU-Daten kombiniert werden. Es bieten sich Methoden aus dem Bereich der Sensordatenfusion an, insbesondere Kalman-Filter (KF). KF gelten als etabliertes Werkzeug seit der Mondlandung und werden in vielen Bereichen angewendet. Sie sind modular im Hinblick auf weitere Sensorquellen (z. B. mehrere GNSS-Empfänger, zusätzliche Geschwindigkeiten) und können einfach implementiert werden. Sie sind für asynchrone und lückenhafte Daten geeignet (z. B. fehlender GNSS-Empfang in Tunneln). Für KF werden die Fahrzeugbewegungen (Zustandsvektor und Bewegungsmodell) und die Messungen (Messgleichungen) separat modelliert.

Für die Ortung (Positionsschätzung als Ziel) kommen KF zum Einsatz, deren Zustandsvektor mindestens die Position und Geschwindigkeit enthält. Diese Größen treten in den GNSS-Daten auf. Die IMU-Beschleunigungen und -Drehraten können über das Bewegungsmodell im KF-Zeitupdate eingebracht werden und müssen nicht im Zustandsvektor stehen. Werden Kartendaten verwendet, so wird die Position als skalare Position entlang einer Pfadhypothese geschätzt.

Für die genaue Schätzung von longitudinalen Beschleunigungen bietet sich ein KF an, welches im Zustandsvektor die Beschleunigung (skalar, longitudinal), Geschwindigkeit (skalar), und den Offset oder Bias der longitudinalen IMU-Beschleunigung enthält. Die Position kann ignoriert werden, was das Schätzproblem deutlich vereinfacht. Es bietet sich zudem eine Erkennung des Fahrzeugstillstands an, da im Stillstand der IMU-Bias direkt messbar wird (tatsächliche Beschleunigung des Fahrzeugs = 0). Wichtig ist, dass dieselben Eingangsdaten (GNSS, IMU) wie bei der Ortung verwendet werden können. Die Schätzung von Beschleunigungen zum Zweck der Modellierung ist keine Online-Anwendung im Gegensatz zur Ortung für das autonome Fahren. Es können daher zunächst sämtliche Messdaten aufgezeichnet werden und offline verarbeitet werden. Für die Schätzung zu einem beliebigen Zeitschritt sind Daten der folgenden Zeitschritte verfügbar. Mehr Daten bedeuten (geschickt verarbeitet) reduzierte Schätzfehler. Zudem können die Daten zunächst in z. B. einzelne Fahrten aufgeteilt werden. KF bieten auch die Methodik für Offline-Verfeinerung von Online-Ergebnissen (Online Kalman Filter, Offline Rauch-Tung-Striebel-Smoother auf den KF-Ergebnissen).

2.3.5 Vollautomatische Durchführung der Rangierbewegungen durch eine automatisierte Rangierlokomotive

Im Rahmen des Projekts RangierTerminal4.0 konnte das Logistiksystem für den Containerumschlag und das neu geschaffene IT-System für den Bahnbetrieb (RT40-Moduls) über entsprechende Schnittstellen integriert und damit zusammengeführt werden. Die Planung der Rangierfahrten kann so auf die vorhandenen Prozesse des Containerumschlags besser abgestimmt und somit auch optimiert werden.

2.3.5.1 Test und Validierung

Die Interaktion der infrastrukturseitigen Auftragsplanung mit der Fahrzeugsteuerung (ADCU) wurde zunächst auf Simulationsebene mit Rangieraufgaben für das im JadeWeserPort zur Verfügung stehende Testfeld erprobt und validiert. Dazu ist der komplette automatisierte Betrieb der Lokomotive

von der Aktivierung der Steuerung über die Betriebsbereitschaft und der Ausführung der Rangieraufträge bis hin zum Senden der Statusmeldungen simuliert worden. In der nächsten Stufe wurden Tests der kompletten Kommunikation zur Auftragsabwicklung inklusive der daraus resultierenden Rangierbewegungen im realen Testfeld durchgeführt. Dazu wurde die Kommunikation des RT40-Moduls mit der ADCU mittels verschiedener Rangieraufträge von der Aktivierung der Fahrzeugsteuerung über das Anfordern der Betriebsbereitschaft und das Durchführen des Rangierauftrags bis hin zur Fertigmeldung der Lokomotive an das RT40-Modul erprobt. Weiterhin ist die Interaktion der ADCU mit der PBC durch das Generieren und Umsetzen von Fahrplanweisungen aus Rangieraufträgen auf der Lokomotive erprobt und validiert worden. Die Funktion des Moduls Ortung und Orientierung wurde ebenso erprobt wie die Umfelderkennung und die Weiterleitung der generierten Objektliste an die ADCU.

Außerdem wurden folgende Funktionen getestet und validiert:

- **Tests zur Betriebssicherheit**
 - Halt bzw. Not-Halt am Hindernis
 - Deaktivieren des Automatikmodus nach dem Ansetzen bevor der Arbeitsauftrag an den Rangierer erteilt wird
- **Längsdynamik**
 - genaues Anhalten am Ziel des Rangierauftrags mittels einer Wegzielbremsung
 - Einhalten der im Rangierauftrag vorgegebenen Sollgeschwindigkeiten mittels Traktionssteuerung und Geschwindigkeitszielbremsung
- **Ansetzen**
 - Bremspunkte und Ansetzgeschwindigkeit für den Ansetzmodus
- **Durchführen von Rangieraufträgen mit Rangierkupplung**
 - Öffnen der Rangierkupplung in Abhängigkeit der im Rangierauftrag definierten Rangierfahrt mit oder ohne Wagen
- **Integration des Rangierers in den Ablauf des Rangierauftrags**
 - Zusammenwirken von ADCU und RT40-Modul beim Aktivieren und Deaktivieren des Automatikmodus und dem Erteilen des Arbeitsauftrags an den Rangierer (s. Funktionsabläufe unter 2.2.5)

Die Tests sowie die Validierung wurden im Rahmen von (Arbeitspaket 7) durchgeführt.

2.3.5.2 Dauererprobung

Im Rahmen des Arbeitspaketes 8 wurden zunächst Szenarien für die anwendungsbezogene Dauererprobung des Demonstrators im Testfeld des JWP festgelegt (s. Tabelle 2 und Tabelle 3). Da für diese Testfahrten nur ein Teil der „Vorstellgruppe“ zur Verfügung stand, wurde folgende Randbedingungen für das Testfeld festgelegt (vgl. auch Abbildung 1):

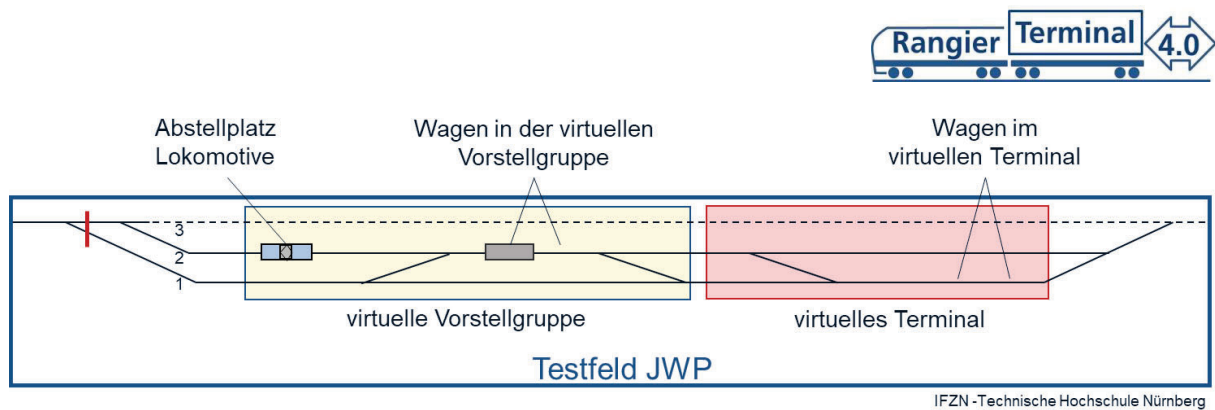


Abbildung 18: Testfeld im JWP, für die Demonstration zweier Use Cases (Skizze), Quelle: THN

Innerhalb des Testfeldes wurden Bereiche für eine virtuelle Vorstellgruppe sowie ein virtuelles Terminal definiert, die für die Simulation der Auftragsabwicklung dienen (s. Abbildung 18).

Tabelle 2: Szenario 1

Szenario 1: Wagen aus dem Terminal in die Vorstellgruppe und zurück ins Terminal rangieren		
Teil-RA	Benennung	Beschreibung
1.1	Vorlauf	Fahrt vom Abstellplatz ins Terminal; Ansetzen an den entsprechenden Wagen auf Gleis 1; Kuppeln, Schlauchen, Bremse lösen (Fahrwegüberwachung durch VSU)
1.2	Rangierfahrt mit Wagen in die Vorstellgruppe	Fahrt mit gezogener Einheit vom Terminal in die Vorstellgruppe auf Gleis 2; (Fahrwegüberwachung durch Triebfahrzeugführer)
1.3	Rangierfahrt mit Wagen ins Terminal	Fahrt mit geschobener Einheit von der Vorstellgruppe ins Terminal auf Gleis 2; Entkuppeln, Entschlauchen, Bremse anlegen (Fahrwegüberwachung durch Rangierer)
1.4	Nachlauf	Fahrt vom Terminal in die Vorstellgruppe auf Gleis 2 (Fahrwegüberwachung durch Triebfahrzeugführer)

Tabelle 3: Szenario 2

Szenario 2: Wagen aus dem Terminal in die Vorstellgruppe rangieren und Lok abstellen		
Teil-RA	Benennung	Beschreibung
1.1	Vorlauf	Fahrt von der Vorstellgruppe ins Terminal auf Gleis 1; Ansetzen an den entsprechenden Wagen auf Gleis 1; Kuppeln, Schlauchen, Bremse lösen (Fahrwegüberwachung durch VSU)
1.2	Rangierfahrt mit Wagen in die Vorstellgruppe	Fahrt mit gezogener Einheit vom Terminal in die Vorstellgruppe auf Gleis 2; Entkuppeln, Entschlauchen, Bremse anlegen (Fahrwegüberwachung durch Triebfahrzeugführer)
1.3	Nachlauf	Fahrt von der Vorstellgruppe zum Abstellplatz auf Gleis 2 (Fahrwegüberwachung durch Triebfahrzeugführer)

Mit Hilfe der Erprobungsszenarien wurden vornehmlich die Softwarepakete der verschiedenen Module sowie die Prozessabläufe zur Abwicklung der Rangieraufgaben validiert und verbessert.

Nach dem Abschluss der Dauererprobung konnten im Logistiksystem beliebig generierte Rangieraufgaben an die Lokomotive weitergegeben und automatisch ausgeführt werden. Dabei war die Infrastrukturseite ständig über Standort und Tätigkeit der Lokomotive informiert.

2.3.5.3 Ergebnisse der Dauererprobung

In der Dauererprobung konnte die stabile Funktion der Systeme in den folgenden Bereichen nachgewiesen werden:

- **Generierung von Rangieraufträgen aus Logistikdaten (dbh)**

Aktueller Stand:

- Eine Schnittstelle zum Fahrdienstleiter-System (Stellwerk), mit deren Hilfe ein Status- und Daten-Austausch zwischen dem System des Fahrdienstleiters und dem von dbh zu entwickelnden RT40-System stattfinden kann, war leider aus rechtlichen Gründen nicht möglich.

Ausblick:

- Sobald die rechtlichen Rahmenbedingungen es erlauben würden, wäre die Realisierung einer Schnittstelle sehr wünschenswert, um die Kommunikation auf „Zuruf“ zwischen dem Fahrdienstleiter und dem Nutzer des RT40-Systems zu eliminieren. Damit könnten bspw. Informationen wie „Gleis frei“ direkt im RT40-System angezeigt werden.

- **Kommunikation Infrastruktur-Lokomotive (WLH)**

Aktueller Stand:

- Die Umwandlung der Fahraufträge für die ADCU, welche aus dem RT40 bereitgestellt werden, ist durch den J.I.M. Server problemlos möglich
- Die Übertragung der Daten zwischen der Landseite und der Lokomotive ist zwischen dem J.I.M. Server und dem J.I.M. Controller auf der Lokomotive ebenfalls problemlos möglich.
- Die Verbindung erfolgt über LTE und unterliegt der Verfügbarkeit des Mobilfunknetzes
- Eine sicherheitsgerichtete Übertragung ist mit der aktuellen Architektur nicht möglich, so dass insbesondere z.B. für die Not-Halt-Übertragung eine sicherheitsfähige Übertragung realisiert werden sollte

Ausblick:

- Eine Aufteilung der Prozesskette über viele System bietet auch ein hohes Fehlerpotenzial. Daher sollte versucht werden, sämtliche Funktionen, die keine direkte Interaktion mit der Loksteuerung haben, in der Landseite zu verarbeiten. Hierfür ist jedoch eine echtzeitfähige Kommunikation notwendig, die z.B. über 5G realisiert werden könnte.
- Eine Nutzung von 5G für eine sicherheitsgerichtete Verbindung sollte in Zukunft untersucht werden, um den sicheren Betrieb der Lokomotive aus der Ferne gewährleisten zu können.

- **Umsetzen des Rangierauftrags in Fahrplanweisungen für die Loksteuerung (THN)**

Aktueller Stand:

- Die ADCU setzt alle ankommenden Rangieraufträge in entsprechende Fahrplanweisungen um und leitet diese an die PBC weiter.
- Laufende Rangieraufträge können z.B. durch den Fdl unterbrochen oder auch ganz abgebrochen und durch neue ersetzt werden.
- Die ADCU bestimmt für alle übermittelten Objekte die Hindernisrelevanz und leitet daraus die entsprechenden Fahrplanweisungen ab. Die Lokomotive bleibt bei Hindernissen im Fahrweg in einem entsprechenden Sicherheitsabstand davor stehen, oder führt, bei zu geringem Abstand zum Hindernis, eine Schnellbremsung aus.
- Sieht der Rangierauftrag das Ansetzen an einen Wagen vor, so wird der Wagen zuverlässig als solcher klassifiziert und der Ansetzmodus aktiviert, wenn er sich in einem für das Ansetzen vorgesehenen Streckenabschnitt befindet.
- Beim Bremsen unterscheidet die ADCU zwischen den Bremszyklen „Lokomotive alleine“ und „Zug“. Beim Bremszyklus „Zug“ wird zunächst auf eine geringe Geschwindigkeit abgebremst und dann kurz vor dem Brems-Ziel eine finale Bremsstufe gesetzt um die Genauigkeit beim Anhalten zu erhöhen.
- Die Infrastrukturseite, Fdl und RT40-Modul werden kontinuierlich durch die Statusmeldungen über Standort und Tätigkeit sowie besondere Ereignisse (Hindernis, Schnellbremsung...) der Lokomotive informiert.

Ausblick:

- Für das Rangieren größerer Zugkonstellationen muss ein Fahrermodell entwickelt werden, dass die Längsdynamik und dabei speziell das Bremsen ermöglicht.
- Die Hindernisrelevanz für sich bewegende Objekte muss ebenso wie das Umsetzen darauf abgestimmter Fahrplanweisungen noch entwickelt werden (z.B. sich bewegende Personen außerhalb des Lichttraumprofils).

- **Umsetzen der Fahrplanweisungen in Fahr- und Bremsmanöver (WLH)**

Aktueller Stand:

- Eine Leistungs- und Bremssteuerung der Lokomotive über die Schnittstelle der Funkfernsteuerung ist möglich. Dadurch wird die Sicherheitsarchitektur der Lokomotivsteuerung nicht angetastet, so dass zu jederzeit eine sichere Rückfallebene existiert. Besonders aus Zulassungssicht ist dies ein großer Vorteil.
- Die Leistungssteuerung erfolgt über sogenannte Leistungsstufen, welche in der Loksteuerung programmiert sind. Über diese Stufen wird die Drehzahl des Motors schrittweise erhöht bzw. reduziert. Dies ermöglicht eine eher grobe, aber ausreichende Regelung der Geschwindigkeit.
- Die Bremssteuerung erfolgt in Abhängigkeit der vorgegebenen Anhängelast über feste Bremsdrücke. Für Einzelfahrten der Lokomotiven oder Fahrten mit 1-2 Waggons ist die

Genauigkeit ausreichend. Insbesondere bei wechselnden Umweltbedingungen wie Nässe existiert jedoch eine größere Abweichung.

Ausblick:

- Die Leistungs- und Bremssteuerung sollte in die Loksteuerung direkt integriert werden. Dazu ist eine umfassende Sicherheitsbetrachtung insbesondere für die Zulassungsfähigkeit notwendig
- Die Ansteuerung des Motors sollte zukünftig über eine direkte Drehzahlsteuerung erfolgen, so dass eine direkte und feinfühlige Leistungsregelung möglich ist. Hierdurch können sanftere Ansetzvorgänge und eine energiesparendere Fahrweise realisiert werden.
- Für die Bremsregelung muss ein umfassendes Regelmodell entwickelt werden, da sich gezeigt hat, dass Umwelteinflüsse bereits bei der Einzelfahrt der Lokomotive großen Einfluss haben. Hier ist ein Regelmodell notwendig, das ohne große Versuche auskommt, sondern selbstlernend ist, da die Bremsversuche für große Versuchspläne extrem aufwendig sind.

- **Umfelderkennung (THN)**

Aktueller Stand:

- Die VSU ist mit Hilfe des Lidar-Sensors in der Lage, Objekte vor der Lokomotive, bezogen auf den Fahrweg aus dem Rangierauftrag, zu detektieren und deren Position relativ zur Lokomotive zu bestimmen.
- Die Wagenklassifizierung wird anhand von Geometrie und Position der ermittelten Bounding Box über der Pufferbohle durchgeführt.

Ausblick:

- Für die automatisierte unbesetzte Rangierfahrt in die Kopfgleisanlage des Terminals muss noch eine geeignete Lösung gefunden werden.
- Zur Vervollständigung der Umfelderkennung sollte diese auf die Erkennung bewegter Objekte und die Bestimmung der dazugehörigen Bewegungsvektoren erweitert werden.
- Für eine robustere Umfelderkennung können Sensoren wie Radar und Kamerasysteme integriert werden.
- Die Umfelderkennung kann durch die Klassifizierung weiterer Objekte wie z.B. Personen weiter verbessert werden.

- **Sicherheitsaspekte (THN)**

Aktueller Stand:

- Nach dem Ansetzen wird der Automatikmodus der Lokomotive deaktiviert, bevor der Rangierer seinen Arbeitsauftrag (z.B. Kuppeln, Schlauchen, Bremse lösen) erhält. Er ist dann der Einzige, der nach Abschluss seiner Arbeiten, über den Freigabetaster seitlich an der Lok, den Automatikmodus wieder aktivieren kann.

- Wird bei einem detektierten Hindernis ein Halt oder Not-Halt ausgeführt, bringt die ADCU anschließend die Lokomotive in den Modus „Standby“ und setzt über die Statusmeldungen eine Nachricht an das RT40-Modul ab. Nachdem der Sicherheitsbeauftragte die Situation geklärt hat, muss er um die Lokomotive wieder zu aktivieren eine besondere Betriebsbereitschaftsanforderung an die Lokomotive senden „Anforderung der Betriebsbereitschaft nach Halt / Not-Halt“.
- Es bestehen jederzeit Eingriffsmöglichkeiten durch Fdl, Rangierer oder Triebfahrzeugführer (im Testbetrieb) in laufende Rangieraufträge über das RT40-Modul, den Not-Halt-Taster der Lokomotive und über das Tablet des Rangierers (RT40-Modul).
- Das kontinuierliche Absetzen von Statusmeldungen der ADCU stellt die Verbindung mit der Lokomotive für das RT40-Modul sicher. Beim Ausbleiben dieser Meldungen, kann ein Anhalten der Lok veranlasst werden.

Ausblick:

- Das kontinuierliche Absetzen von Statusmeldungen des RT40-Moduls kann auch für die Lokomotive die Verbindung mit dem RT40-Modul sicherstellen. Beim Ausbleiben dieser Meldungen kann die Lok angehalten werden.

- **Ortung (DLR):**

Aktueller Stand:

- Das Ortungsmodul hat bei der Dauererprobung kontinuierlich Positionsdaten für die ADCU bereitgestellt und wurde erfolgreich in die Lok integriert.

Ausblick:

- Die Ortung ist eine zentrale Komponente für das autonome Rangieren. Weitere Entwicklungen und Tests für Verbesserungen und Sicherheitsnachweise sind notwendig.

3 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Eine detaillierte Aufstellung des zahlenmäßigen Nachweises kann dem Kontrollbericht entnommen werden.

4 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die geleistete Arbeit zur Optimierung der Prozessabläufe durch einen automatisierten Rangierbetrieb von der Vorstellgruppe des JadeWeserPorts ins Terminal war von entscheidender Bedeutung und erwies sich als äußerst angemessen angesichts der Herausforderungen und Anforderungen des Güterverkehrs. Angesichts der Tatsache, dass viele Terminals aufgrund des vertikalen Umschlags keine Oberleitungen aufweisen, war die Einführung eines automatisierten Rangierbetriebs unumgänglich, um einen effizienten und nachhaltigen Güterverkehr zu gewährleisten. Der automatisierte Rangierbetrieb muss aufgrund dieser Infrastrukturanforderungen (keine Oberleitung)

zwingend mit einer Rangierlok durchgeführt werden, die eine eigene Energieversorgung besitzt. Die Implementierung dieses Systems ermöglichte nicht nur eine Steigerung der Zeit- und Energieeffizienz, sondern auch eine Minimierung menschlicher Fehler. Durch die enge Zusammenarbeit verschiedener Stakeholder und die Integration innovativer Technologien konnte eine Lösung entwickelt werden, die nicht nur den aktuellen Anforderungen entspricht, sondern auch den sich wandelnden Bedürfnissen des Güterverkehrs gerecht wird. Insgesamt war die geleistete Arbeit zur Optimierung der Prozessabläufe von großer Bedeutung für die Effizienz, Sicherheit und Nachhaltigkeit im Güterverkehr und erwies sich als äußerst angemessen angesichts der Komplexität der Herausforderungen.

5 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Verwertung am JadeWeserPort (JWP)

Der voraussichtliche Nutzen durch den automatisierten Rangierbetrieb ist vielfältig und umfasst verschiedene Aspekte, die sich positiv auf die Effizienz, Wirtschaftlichkeit und Umweltfreundlichkeit des Güterverkehrs auswirken.

Erstens wird die Implementierung eines automatisierten Rangierbetriebs voraussichtlich zu erheblichen Zeit- und Kosteneinsparungen führen. Durch die Automatisierung der Prozesse können Rangieraufgaben effizienter durchgeführt werden, was zu verkürzten Standzeiten der Züge und einer schnelleren Abfertigung im Terminal führt. Dies reduziert nicht nur die Betriebskosten, sondern steigert auch die Kapazitätsauslastung der Infrastruktur, was wiederum zu einer verbesserten Wirtschaftlichkeit des Hafenbetriebs beiträgt.

Zweitens wird die erhöhte Effizienz des Rangierbetriebs voraussichtlich zu einer verbesserten Pünktlichkeit und Zuverlässigkeit des Güterverkehrs führen. Durch die präzise Planung und Durchführung der Rangieraufgaben können Verzögerungen und Störungen im Betriebsablauf minimiert werden, was insbesondere für die Logistikunternehmen und deren Kunden von großem Vorteil ist.

Insgesamt wird das Ergebnis der Optimierung der Prozessabläufe durch den automatisierten Rangierbetrieb nicht nur kurzfristige, sondern auch langfristige Vorteile für alle Beteiligten bieten. Die verbesserte Effizienz, Pünktlichkeit und Umweltfreundlichkeit des Güterverkehrs wird dazu beitragen, die Wettbewerbsfähigkeit des Hafens zu stärken und seine Position als wichtige Drehscheibe im globalen Logistiknetzwerk weiter zu festigen.

Abschlussarbeiten an der TH Nürnberg:

Art der Arbeit	Bereich	Titel
Masterarbeit	Umfeldererkennung	Aufbau und Test eines Systems zur Objekterkennung
Bachelorarbeit	Umfeldererkennung	Design and Implementation of a Lidar-Based Multiple Object Tracking System for Autonomous Shunting Locomotives

Bachelorarbeit	Umfeldererkennung	Implementierung einer Bodensegmentierung für die Umfeldererkennung automatisierter Rangierlokomotiven
Bachelorarbeit	Automatisches Bremsen	Entwicklung und Erprobung einer Bremssystemsimulation für automatisiertes und autonomes Fahren auf der Schiene

Forschung und Lehre an der TH Nürnberg:

Teile der Ergebnisse des Forschungsprojektes sind in folgende Lehrveranstaltungen an der TH Nürnberg eingeflossen:

- Vertiefungsgebiete der Fahrzeugantriebe (Master Maschinenbau)
- Fahrerassistenzsysteme und autonomes Fahren (Master Maschinenbau)
- Systems Engineering (Master Maschinenbau)
- Fahrzeugantriebstechnik (Bachelor Maschinenbau)

Weiterführende Verwertung bei dbh Logistics IT AG:

Die dbh Logistics IT AG plant die im Rahmen des Projektes entwickelten RT 4.0 - Funktionalitäten weiter zu entwickeln und in der Folge zu vermarkten. Hierbei soll eine umfassende Integration mit den bestehenden dbh-Bahnsystemen CODIS und PRINOS (neu entwickeltes Hafeneisenbahnsystem bei dbh) realisiert werden. Dadurch soll sichergestellt werden, dass die Projektergebnisse auch auf den Standort Bremerhaven (wo ebenfalls das dbh-Bahnsystem CODIS genutzt wird) übertragen werden können. dbh findet sich derzeit dazu in der Prüfung, ob die Weiterentwicklung der RT 4.0 Funktionalitäten als eigenständige Lösung, oder als Ergänzung zu bestehenden dbh-Systemen, wirtschaftlich sinnvoll und technisch umzusetzen ist. Ferner wird geprüft, ob das gewonnene Knowhow auch für weitere Forschungsprojekte genutzt werden kann.

Weiterführende Verwertung bei Reuschling:

Die Ergebnisse aus dem Projekt sollen weiterentwickelt und zu marktreifen Lösungen für das (teil-)autonome Rangieren genutzt werden. Dazu gehören auf dem Reifegradpfad auch die Entwicklung von Assistenzsystemen, z.B. zum Vorrücken oder Ansetzen, bei denen die Hürde des Zulassungsprozesses deutlich geringer ist. Zusätzlich sollen die Lösungen weiterentwickelt werden, so dass sie zukünftig für das „Remote-Shunting“ genutzt werden, bei dem die Lokomotive ortsunabhängig gesteuert werden kann.

Weitere wissenschaftliche Verwertung beim DLR

Wie in Kapitel 2.3.4 erläutert, wurden im Rahmen des Projektes Verwertungspotentiale der angefallenen Ortungsdaten im Simulationskontext identifiziert. Ebenso erfolgt eine Verwertung im Sinne der wissenschaftlichen Erprobung von Methoden, Verfahren und Algorithmen im Kontext Ortung von Schienenfahrzeugen. Ferner entstand eine Reihe unterschiedlicher Veröffentlichungen, entweder im

unmittelbaren Projektkontext oder in anknüpfenden Themengebieten, wie sie in Kapitel 7 aufgeführt sind.

6 Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Die Fragestellung der Umfeldüberwachung und -visualisierung ist Teilaspekt des FuE-Projekts Shunting Assistant & Monitoring Interface for Autonomous Rail Applications (Zuwendungsgeber: Leitmarktagentur NRW, Förderkennzeichen: EFRE-0801677), in dem die Fa. Reuschling ebenfalls Partner des Konsortiums ist. Übergeordnetes Ziel ist die Entwicklung einer mobilen Sensorbox, welche unter anderem die flexible Überwachung der (wechselnden) Zugspitze, auch bei geschobener Fahrt, erlaubt und darüber hinaus auch weitere Arbeitsabläufe des Rangierers unterstützen soll (z.B. Zugtaufe). Wichtigstes Element ist dabei der Aufbau eines lokalen Mesh-Netzwerks zum Datentransport. Ebenfalls bildet in diesem Zusammenhang die Erprobung verschiedener fahrzeugseitiger Sensortypen (Radar, Lidar, Kamera, etc.) sowie die Umfeldvisualisierung Handlungsempfehlungen in Echtzeit. Es ist hervorzuheben, dass das Projekt keine Inhalte des Projektes „Rangierterminal 4.0“ behandelt, sondern dieses ergänzt. Es kann eine klare Abgrenzung vorgenommen werden. Ein erster Austausch ergab, dass zum jetzigen Projektstadium auf beiden Seiten noch keine untereinander nutzbaren Ergebnisse vorliegen. In der Zukunft können die Entwicklungen jedoch genutzt werden, da insbesondere die mobile Sensorbox für die geschobene Zugfahrt ein entscheidender Faktor ist.

7 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses

Art der Veröffentlichung	Titel
Konferenzbeitrag: 19. Internationale Schienenfahrzeugtagung Dresden, 01. bis 03. März 2023 Vortragender: Prof. Dr.-Ing. Martin Cichon Autoren: Prof. Dr.-Ing. Martin Cichon; Dipl.-Ing. (FH) Ralf Falgenhauer	Integrales ATO-System für Rangier-Aufgaben
Vortrag: Lange Nacht der Wissenschaften; 21.10.2023 , Nürnberg Vortragender: Ralf Falgenhauer	Fahrerlose Güterzüge? Von der Vision zur Umsetzung
Imagefilm	Rangierterminal4.0
Konferenzbeitrag: Wissenschaftsforum Mobilität, Duisburg 11.05.2023 Vortragender: Dr.-Ing. Julian Franzen	Virtuelles Fahrermodell für den autonomen Betrieb von Schienenfahrzeugen auf der letzten Meile

Autoren: Dr.-Ing. Julian Franzen, Dr.-Ing. Jannis Sinnemann, Udo Pinders, Prof. Dr. Edwin Kamau	
Zeitschriftenbeitrag: Signal und Draht (115) 4/2023 Autoren: Dr.-Ing. Julian Franzen, Dr.-Ing. Jannis Sinnemann, Udo Pinders, Prof. Dr. Edwin Kamau	Autonomes Fahren – Steuerung als Grundlage des virtuellen Fahrermodells?
Zeitschriftenbeitrag: Eisenbahningenieur Januar 2023 Autoren: Dr.-Ing. Jannis Sinnemann, Dr.-Ing. Julian Franzen, Udo Pinders	Befähigung zum autonomen Fahren im Bestand
Zeitschriftenbeitrag: Geischberger, Jakob und Falgenhauer, Ralf und Hanisch, Romina und Franzen, Julian und Grunwald, Andreas (2021) EI - Der Eisenbahningenieur, Seiten 43-46. Tetzlaff Verlag. ISSN 0013-2810. https://elib.dlr.de/147842/ (Geischberger, 2021)	RangierTerminal4.0: Automatisiertes Rangieren im JadeWeserPort
Interview im Bahnmanager 2/23 von Barbara Feldmann mit Dr.-Ing. Jannis Sinnemann (Reuschling), Romina Hanisch (JWP), Andreas Grunwald (dbh) und Jakob Geischberger (DLR) https://eurailpress-archiv.de/SingleView.aspx?show=5028828	Rangierlok navigiert selbstständig durch den JadeWeserPort
Zeitschriftenbeitrag (geplant und eingereicht) EI - Der Eisenbahningenieur, 07/2024)	JadeWeserPort: Ergebnisse des Projektes RangierTerminal4.0
Zeitschriftenbeitrag: Michael Roth, Judith Heusel, Benjamin Baasch, Kanwal Jahan, Sebastian Schulz, Jörn Groos German Aerospace Center (DLR), Institute of Transportation Systems, Germany 27th ITS World Congress, Hamburg, Germany, 11-15 October 2021 https://elib.dlr.de/141116/	Intelligent in-service shunters in German harbor railways

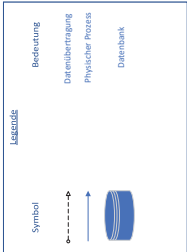
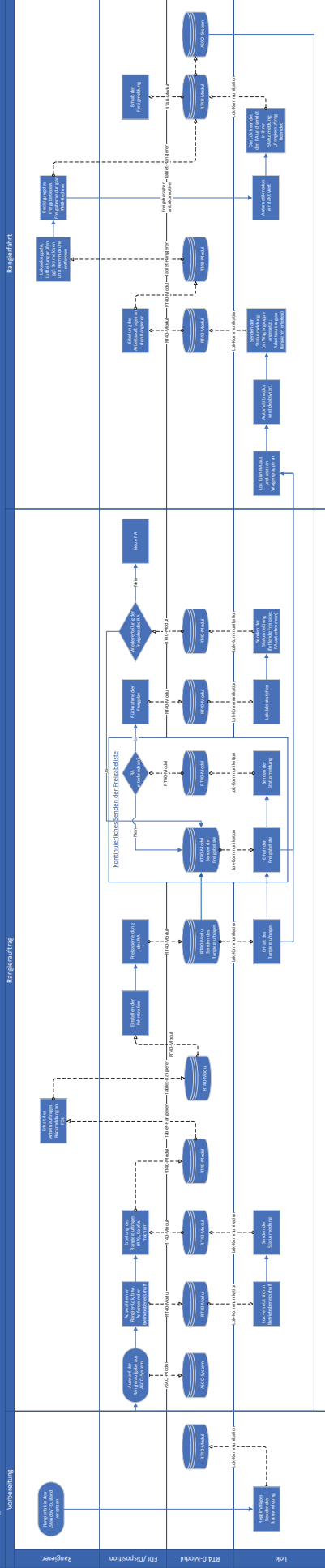
Projektabschlussveranstaltung mit Demonstration unter Teilnahme der Presse und Interessierten aus der Fachwelt JadeWeserPort, 23.11.2023	Projektabschlussveranstaltung RangierTerminal4.0
---	---

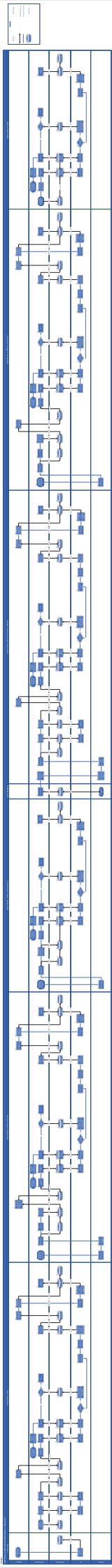
Literaturverzeichnis

- Alvarez Lopez, P., Behrisch, M., Bieker-Walz, L., Erdmann, J., Flötteröd, Y.-P., Hilbrich, R., . . . Wießner, E. (2018). Microscopic Traffic Simulation using SUMO. In: 2019 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC), IEEE. The 21st IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems, 4.-7. Nov. 2018, Maui, USA., (S. pp. 2575-2582).
- Cichon, M., & Schaal, R. (2018). *Vollautomatische Abdrücklokomotive - Machbarkeitsstudie und Aufbau eines Demonstrators.. In: TU Dresden und die DVV Media Group GmbH | Eurailpress Hamburg (Hrsg.): Tagungsband der 16. Internationalen Schienenfahrzeugtagung. Dresden, S. 68–70.*
- Cichon, M., & Schaal, R. (2020). *LocAssysTH® – Fahrassistenzsysteme als Schritt zum automatischen Fahren auf der Schiene; In: NIEßEN, Nils; SCHINDLER, Christian (Hrsg.): IRSA - International Railway Symposium Aachen; Institut of Transport Science, S. 401–412.*
- Geischberger, J. u. (2021). RangierTerminal4.0: Automatisiertes Rangieren im JadeWeserPort. *EI - Der Eisenbahningenieur*. Von <https://elib.dlr.de/147842/> abgerufen
- Reimer, R., Noack, T., Scheier, B., & Meyer zu Hörste, M. (2011). Abschlussbericht: Neue Technologieansätze für automatisierbare Terminals im kombinierten Verkehr (TaT), Teilvorhaben: Hochpräzise, verlässliche Ortung von Kranen und.
- Roth, et.al. (2023). Kartengestützte GNSS/Multi-Sensor-Ortung von Schienenfahrzeugen. *Der Eisenbahningenieur EI*. Von <https://elib.dlr.de/197334/> abgerufen
- Roth, M., Heusel, J., Baasch, B., Jahan, K., Schulz, S., & Groos, J. C. (2021). Intelligent in-service shunters in German harbor railways. *ITS World Congress*. Von <https://elib.dlr.de/141116/> abgerufen

Anlage 1

Sol-Prozess „Kommunikationsinfrastruktur - Lokomotive“





Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN Geplant	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel Schlussbericht RangierTerminal4.0	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Romina Hanisch, Ralf Falgenhauer, Dr.-Ing. Jannis Sinnemann, Frank Hermanowski, Andreas Grunwald, Dr. Michael Roth, Jakob Geischberger	5. Abschlussdatum des Vorhabens Mai 2024
	6. Veröffentlichungsdatum Mai 2024
	7. Form der Publikation
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) JadeWeserPort Realisierungs GmbH & Co. KG, Pazifik 1, 26388 Wilhelmshaven Container Terminal Wilhelmshaven JadeWeserPort-Marketing GmbH & Co. KG, Pazifik 1, 26388 Wilhelmshaven Westfälische Lokomotiv-Fabrik Reuschling GmbH & Co. KG, Eickener Str. 45, 45525 Hattingen dbh Logistics IT AG, Martinistr. 47-49, 28195 Bremen Technische Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm, Institut für Fahrzeugtechnik, Keßlerplatz 12, 90489 Nürnberg Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt e.V., Institut für Verkehrssystemtechnik, Lilienthalplatz 7, 38108 Braunschweig	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen 19H20003F
	11. Seitenzahl 44
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) 53175 Bonn	13. Literaturangaben 7
	14. Tabellen 3
	15. Abbildungen 18
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	
18. Kurzfassung 1. Derzeitiger Stand von Wissenschaft und Technik In Vorgängerprojekten wurde die grundsätzliche technische Machbarkeit (teil)automatisierten Rangierens aufgezeigt. Ebenso lagen grundsätzliche Strategien der Fahr- und Bremssteuerung, der sensorbasierten Hinderniserkennung sowie der Ortung von Schienenfahrzeugen vor. Zudem konnte auf eine offene Schnittstellenarchitektur zur Datenübertragung zurückgegriffen werden. 2. Begründung/Zielsetzung der Untersuchung Das Gesamtziel des Projektes RangierTerminal4.0 war es, im JadeWeserPort (JWP) mit einer entsprechend ausgerüsteten Rangierlokomotive vollautomatisch Containerzüge zu rangieren und dabei die Fahrten optimiert nach den Anforderungen des Containerumschlags und des Bahnbetriebs durchzuführen. Dabei war die Entwicklung einer nahtlosen Prozesskette unter Einbezug diverser unterschiedlicher Teilprozesse und -systeme von besonderer Bedeutung. Das Gesamtziel wurde mit den drei Teilzielen (Teilprojekten) „Infrastruktur“, „Betriebsmittel“ und „Steuerung“ erreicht. 3. Methode Auf Basis der Analyse des gegenwärtigen IST-Prozesses der Rangiervorgänge im JWP wurde zunächst ein SOLL-Prozess bzw. ein Zielbild erstellt. Dieses definiert das Zusammenspiel unterschiedlicher technischer Komponenten und Systeme im Sinne einer angestrebten Gesamtsystemtopologie, die die Grundlage der späteren Umsetzung bildet. Wesentliche Bestandteile dieser sind das landseitig neu entwickelte „RT40-Modul“ zur Erzeugung und Weitergabe von Rangieraufträgen an die Lokomotive, sowie lokomotivseitig die ADCU (Autonomous Decision and Control Unit) zur Generierung von Fahrplanweisungen und die PBC (Power and Break Control) zur Umsetzung dieser Anweisungen in Steuerbefehle für die Lokomotivsteuerung. Zudem wurden Module zur Kommunikation, Ortung und Fahrwegüberwachung implementiert. 4. Ergebnis Die technische Umsetzung wurde anhand definierter Szenarien erfolgreich demonstriert. Die Erprobung fand in der Vorstellgruppe des JadeWeserPorts statt und wies eine grundsätzlich stabile Funktion insb. in folgenden Bereichen nach: Generierung von Rangieraufträgen aus Logistikdaten, Kommunikation Infrastruktur-Lokomotive, Umsetzen des Rangierauftrags in Fahrplanweisungen für die Loksteuerung, Umsetzen der Fahrplanweisungen in Fahr- und Bremsmanöver, Umfelderkennung, Sicherheitsaspekte, Ortung 5. Schlussfolgerung/Anwendungsmöglichkeiten Das Projekt erprobte erfolgreich automatisierte Rangiervorgänge im Hafenkontext auf Basis einer neu definierten, integrierten Prozesskette. Es stellt somit eine wertvolle Grundlage für weitere Entwicklungen hin zu marktreifen Lösungen und Funktionalitäten dar.	
19. Schlagwörter Automatisierung, Rangieren, Hafen, Prozesskette	
20. Verlag	21. Preis

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN planned	2. type of document (e.g. report, publication) final report
3. title Schlussbericht RangierTerminal4.0	
4. author(s) (family name, first name(s)) Romina Hanisch, Ralf Falgenhauer, Dr.-Ing. Jannis Sinnemann, Frank Hermanowski, Andreas Grunwald, Dr. Michael Roth, Jakob Geischberger	5. end of project Mai 2024
	6. publication date Mai 2024
	7. form of publication
8. performing organization(s) (name, address) JadeWeserPort Realisierungs GmbH & Co. KG, Pazifik 1, 26388 Wilhelmshaven Container Terminal Wilhelmshaven JadeWeserPort-Marketing GmbH & Co. KG, Pazifik 1, 26388 Wilhelmshaven Westfälische Lokomotiv-Fabrik Reuschling GmbH & Co. KG, Eickener Str. 45, 45525 Hattingen dbh Logistics IT AG, Martinistr. 47-49, 28195 Bremen Technische Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm, Institut für Fahrzeugtechnik, Keßlerplatz 12, 90489 Nürnberg Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt e.V., Institut für Verkehrssystemtechnik, Lilienthalplatz 7, 38108 Braunschweig	9. originator's report no.
	10. reference no. 19H20003F
	11. no. of pages 44
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) 53175 Bonn	13. no. of references 7
	14. no. of tables 3
	15. no. of figures 18
16. supplementary notes	
17. presented at (title, place, date)	
18. abstract 1. current state of science and technology The basic technical feasibility of (partially) automated shunting was demonstrated in previous projects. Basic strategies for driving and braking control, sensor-based obstacle detection and the localisation of rail vehicles were also available. In addition, an open interface architecture for data transmission could be utilised. 2. objective The overall objective of the RangierTerminal4.0 project was to shunt container trains fully automatically at JadeWeserPort (JWP) using a respectively equipped shunting locomotive in an optimised manner in accordance with the requirements of container transshipment and rail operations. The development of a seamless process chain incorporating various different sub-processes and systems was of particular importance. The overall objective was achieved with the three sub-objectives (sub-projects) "Infrastructure", "Equipment" and "Control". 3. method Based on the analysis of the current process of shunting operations at the JWP, a target process or target image was created at first. This defines the interaction of different technical components and systems in the sense of a desired overall system topology, which forms the basis for subsequent implementation. Key components of this are the newly developed "RT40 module" on the land side for generating and forwarding shunting orders to the locomotive, as well as the ADCU (Autonomous Decision and Control Unit) on the locomotive side for generating driving instructions and the PBC (Power and Break Control) for converting these instructions into control commands for the locomotive control system. Modules for communication, localisation and route monitoring were also implemented. 4. result The technical implementation was successfully demonstrated using defined scenarios. Testing took place in the JadeWeserPort track group and demonstrated a fundamentally stable function, particularly in the following areas: Generation of shunting orders from logistics data, communication between infrastructure and locomotive, conversion of the shunting order into driving instructions for the locomotive control, conversion of the driving instructions into driving and braking manoeuvres, environment recognition, safety aspects, localisation 5 Conclusion/possible applications The project successfully tested automated shunting processes in a harbour context on the basis of a newly defined, integrated process chain. It therefore represents a valuable basis for further developments towards market-ready solutions and functionalities.	
19. keywords Automation, Shunting, Harbor, Process chain	
20. publisher	21. price