

Sachbericht zum Verwendungsnachweis

Teil I – Kurzbericht

WIRI-Projekt: Exakte Lokalisierung und Fahrregelung für autonome Eisenbahnfahrzeuge
(FKZ 03WIR1221A)

**Zuwendungs-
empfänger:** Technische Universität Chemnitz

Laufzeit: 08/2023 – 07/2025

Gefördert durch:



1 Ursprüngliche Aufgabenstellung

Im Projekt ELFE konzentrierte sich die Arbeit der Professur Schaltkreis- und Systementwurf (SSE) auf drei wesentliche Kernbereiche: Analyse der eingesetzten Ortungssysteme (sowohl UWB als auch GNSS), Untersuchung von Manipulationsmöglichkeiten und Kriminalprävention, und die Bewertung von Software- und Systemsicherheit im Bahnumfeld.

Die Ortungssysteme wurden hinsichtlich ihrer Tauglichkeit für eisenbahnspezifische Reichweiten-, Verfügbarkeits- und Sicherheitsanforderungen untersucht. Maßnahmen zur Kriminalprävention und gegen Manipulation beider Systeme wurden recherchiert und hinsichtlich ihres Gefährdungspotenzials eingeordnet. Da GNSS und das im Projekt genutzte UWB-Lokalisierungssystem eine grundsätzlich ähnliche Systemarchitektur verfolgen, konnten Parallelen zwischen beiden Systemen gezogen werden. Diese Ähnlichkeiten wirken sich im Rahmen der Gefährdungsanalyse sowohl positiv – etwa durch übertragbare Sicherheitsmechanismen – als auch negativ aus, da bestimmte Angriffspfade systematisch ähnlich auftreten können. Hierzu wurde ein Sicherheitskonzept erstellt, das beschreibt, welche zusätzlichen Maßnahmen erforderlich sind, um Manipulationen von Positionsdaten zu erkennen und auszuschließen.

Ein weiterer Punkt war die Untersuchung von Maßnahmen zur Reichweitenerhöhung von Ultra breitband (UWB), da sich die bisherige Reichweite von typischerweise 20 Metern im Innenbereich nur schlecht auf die geometrischen Dimensionen und Rahmenbedingungen im Schienenverkehr übertragen lassen.

Ein Kernaspekt in der Entwicklung von Software auf Schienenfahrzeugen sind Sicherheitsanforderungen im Kontext der SIL-4-Tauglichkeit. Dafür wurde zunächst untersucht, welche bestehenden Methoden und Qualitätsansätze im Bahnbereich genutzt werden können und wie sie sich auf die im Projekt entstehenden Softwaremodule übertragen lassen. Auf dieser Grundlage entstand ein Konzept, mit dem sich die Qualität und Sicherheit der Funktionen bewerten lassen. Anschließend wurden einzelne Funktionen beispielhaft angepasst und überprüft, um zu zeigen, wie die geforderten Sicherheitsniveaus grundsätzlich erreicht werden können.

Im Ergebnis entstand ein Gesamtkonzept, welches eine robuste und vertrauenswürdige Ortungsinformation bereitstellt, und die Grundlage für eine spätere sicherheitsrelevante Nutzung im Schienenverkehr bildet.

Die Professur Regelungstechnik und Systemdynamik (RTSD) arbeitet im Projekt mit den von den Projektpartnern bereitgestellten Lokalisationsdaten. Dabei sind die Kernbereiche die Modellierung der Bremsdynamik, der Entwurf eines Bremsreglers sowie seine Implementierung auf dem Zugrechner.

Die Modellierung der Bremsdynamik befasst sich mit einem mathematisch-physikalischen Modell, welches das Bremsen beschreibt. Dieses entsteht aus einer Literaturrecherche und zulässigen Vereinfachungen.

Die Bremsregelung ist das Kernstück des Projekts. Sie beinhaltet verschiedene Reglerentwürfe, um den Zug am Ende mit einer Genauigkeit von unter zehn Zentimetern zu bremsen. Dabei sollen auch Bremskurven erzeugt werden, die einen typischen Bremsverlauf darstellen. Diese dienen als Referenzwert. Die Regler werden hierbei so entworfen, um sowohl Stellgrößenbeschränkungen (also für den Fahr-Brems-Hebel) als auch Zustandsbeschränkungen (maximale Beschleunigung bzw. maximales Abbremsen) zu berücksichtigen. Inbegriffen ist auch eine Datenvorverarbeitung, wie Glättung und Interpolation.

Zuletzt sollen die entworfenen Algorithmen auf dem Zugrechner implementiert werden und über MQTT-Protokolle mit dem Zug mitsamt Sensoren kommunizieren.

Das Zentrum für Wissens- und Technologietransfer (ZWT) hat im Rahmen des Projekts die Projektleitung und -koordination übernommen und wurde dabei durch den SRCC e. V. unterstützt. Zudem hat das ZWT bei den Vorbereitungen zur späteren Implementierung im Forschungszug (u. a. Prüfung der Hardware und Schnittstellenmanagement) unterstützt.

2 Ablauf des Vorhabens

Zu Beginn erfolgten mehrere Projekttreffen mit allen Projektpartnern sowie bilaterale Treffen, um ein Gesamtbild des Vorhabens zu erarbeiten. Im Zuge dessen wurden auch die Übergaben zwischen den Projektpartnern besprochen, also beispielsweise in welchem Format Daten bereitgestellt werden. In den mindestens monatlich stattfindenden Projekttreffen wurden auch weitere Schritte und Abläufe der Testfahrten abgestimmt. Diese Treffen dienten auch zur Qualitätskontrolle, um den Fortschritt im Projekt zu überprüfen. In mehreren Tests bzw. Testfahrten (Juni 2024, September 2024, März 2025, Mai 2025) wurden Messdaten in Waschhalle, Tunnelbereich und offener Strecke erhoben, die den Projektpartnern als Grundlage zur Modellierung, Fusion und Entwicklung dienten.

3 Zusammenfassung der wesentlichen Ergebnisse

Das Projekt ELFE konnte erste Erkenntnisse zur exakten Lokalisierung sammeln, welche in einem Nachfolgeprojekt vertieft werden sollen.

Die Professur RTSD konnte ihr Wissen zur Modellierung der Zugdynamik erweitern. Weiterhin wurden basierend darauf verschiedene Regelungsentwurfsverfahren angewandt, wie etwa ein PI-Regler, ein modellprädiktiver Regler sowie ein linear-quadratischer Regler. Der Vergleich der drei Regelungsverfahren stellt einen Erkenntnisgewinn aus dem Projekt dar. Es konnte gezeigt werden, dass trotz des relativ einfachen Entwurfs der LQR die besten Ergebnisse liefert, welche mit einem Positionsfehler von etwa einem Zentimeter beim Bremsen die geforderten zehn Zentimeter übertrifft. Leider konnte der Algorithmus nicht am Zug umgesetzt werden.

Weiterhin konnten durch den Aufbau der Kommunikation wesentliche Erkenntnisse aus dem Bereich der Anwendung gesammelt werden. Dazu zählt zum einen die Inbetriebnahme von Sensoren, der Aufbau einer Kommunikation zwischen Sensoren/Zug und Regler über MQTT-Protokolle sowie die Anwendung eines Reglers auf echte Sensordaten. Dort zeigte sich, welche Schritte zusätzlich erforderlich sind. Dazu zählen Glättung und Interpolation.

Die Professur SSE konnte ihr Verständnis zu UWB-basierten Lokalisierungssystemen in bahntypischen Umgebungen deutlich erweitern. Dazu gehörten Untersuchungen zu Einflussfaktoren auf die Funkkommunikation sowie Recherchen zu sicherheitsrelevanten Fragestellungen, insbesondere zu möglichen Manipulations- und Störszenarien, die für zukünftige UWB-Systeme in sicherheitskritischen Anwendungen relevant sind. Auf dieser Grundlage entstand ein Konzept zur dauerhaften Überwachung und Integritätsprüfung eines UWB-Netzwerkes, das praktische Ergebnisse im Laboraufbau und Feldtests liefern konnte. Darüber hinaus wurde das Wissen im Bereich der Softwarequalität sicherheitskritischer Systeme vertieft. Durch Literaturrecherche, die Arbeit mit bahntypischen Normen sowie die Anwendung von Softwaretests und Code-Coverage-Analysen konnten wichtige Erfahrungen gesammelt werden, die für zukünftige Entwicklungen in diesem Umfeld von Bedeutung sind.

Ein weiterer Schwerpunkt war die Entwicklung einer plattformübergreifenden Softwareumgebung zur Simulation der GNSS- und UWB-Abdeckung in Innen- und Außenbereichen. Die realitätsnahe 3D-Darstellung ermöglicht eine gezielte Planung von Ankerpositionen und zeigt anschaulich, wie sich bauliche Strukturen auf die Ortungsqualität auswirken. Die Anwendung wurde in realitätsnahen Szenarien sowie mithilfe eines Roboters getestet und validiert.

Durch die im Projekt durchgeführten Testfahrten konnte gezeigt werden, dass GNSS-Signale allein in komplexen Umgebungen schnell an Genauigkeit verlieren. Die Fusion mit UWB-Daten führte hingegen in Gebäuden, wie der Waschhalle, zu einer stabilen und gleisgenauen Positionsbestimmung.

Es konnten wesentliche praktische Erfahrungen im Aufbau der Kommunikationsstrecke zwischen Sensorik, Fusion, Regler und Zugrechner gesammelt werden, was für die spätere Umsetzung im Gesamtsystem von Bedeutung ist. Insgesamt bildet das Projekt eine belastbare Grundlage für weiterführende Forschung zu hochpräziser Ortung, sicherer Fusion und modellbasierter Regelung im Bahnumfeld – einschließlich möglicher SIL-Bewertungen und sicherheitstechnischer Betrachtungen für zukünftige TDoA-UWB-Systeme.

Sachbericht zum Verwendungsnachweis

Teil II – Ausführlicher Bericht

WIRI-Projekt: Exakte Lokalisierung und Fahrregelung für autonome Eisenbahnfahrzeuge
(FKZ 03WIR1221A)

**Zuwendungs-
empfänger:** Technische Universität Chemnitz

Laufzeit: 08/2023 – 07/2025

Gefördert durch:



1 Durchgeführte Arbeiten

AP0: Projektleitung und -koordination

Das Zentrum für Wissens- und Technologietransfer (ZWT) hat im Rahmen des Projekts die Projektleitung und -koordination übernommen und wurde dabei durch den SRCC e. V. unterstützt. Es fanden regelmäßig Projekttreffen sowie bilaterale Gespräche statt. Die Projekttreffen dienten auch zur Qualitätskontrolle, um den Fortschritt im Projekt zu überprüfen. Des Weiteren koordinierte und unterstützte das ZWT die Berichtslegung sowie die Veröffentlichung von Projektergebnissen.

AP1: Systemspezifikationen und -konzeptionierung

Das erste Arbeitspaket umfasst die Konzeptionierung eines dynamischen Zugkinetikmodells für Bremsvorgänge in einer Simulationsumgebung (MATLAB) und die Verknüpfung zu bestehenden Modellen. In Hinblick auf die Umsetzung im Forschungszug erfolgte auch eine Absprache zu Schnittstellen und Kommunikationsprotokollen in Abstimmung mit Benutzeranforderungen und Benutzerspezifikationen in technischen Anwendungen.

Bevor die Professuren Regelungstechnik und Systemdynamik (RTSD) und Schaltkreis- und Systementwurf (SSE) mit der Bearbeitung ihrer Arbeitspakete begannen, erfolgte eine Abstimmung mit allen Projektpartnern über die Projektziele und Meilensteine. Dabei wurde in mehreren Folgetreffen stets über den Fortschritt berichtet und die Projektziele im Auge behalten. In einem der ersten Projekttreffen wurde ein Systemkonzept entwickelt, welches in den Folgetreffen ergänzt und verbessert wurde. Abbildung 1 stellt dieses Konzept dar.

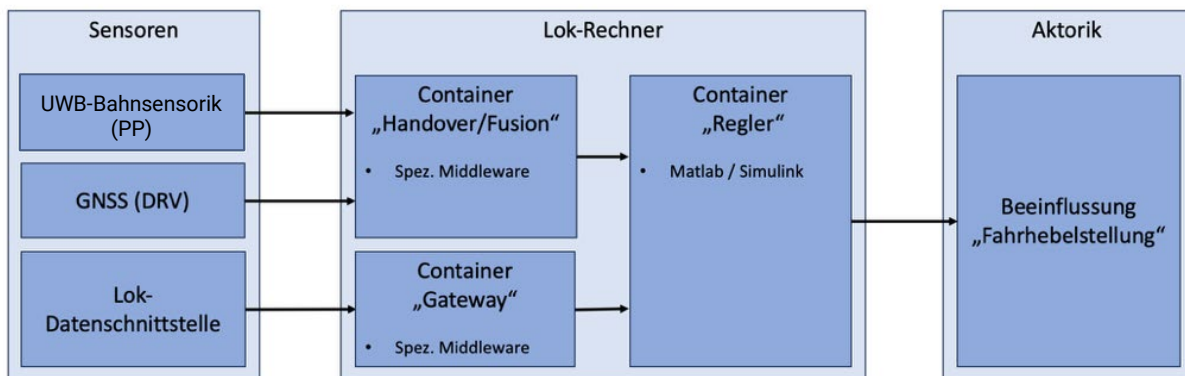


Abbildung 1: Systemkonzept der im Projekt geplanten Module

Das Systemkonzept ist in drei Hauptbereiche eingeteilt. Im Block „Sensoren“ befinden sich die verschiedenen Sensormodalitäten. Die UWB-Bahnsensorik (PP) liefert die Daten vom kombinierten UWB/GNSS Sensormodul „SIO3 UWB & RTK positioning module“ der Ci4Rail GmbH und wird im Projekt von der Pinpoint GmbH genutzt. GNSS (DRV) stellt die Daten des GNSS-Sensors der DRAIVE GmbH bereit. Die Lok-Datenschnittstelle stellt die Verbindung zur Lok her, um an die Sensorwerte des Testzuges zu kommen. Im Block „Lok-Rechner“ entstanden Container, welche verschiedene Funktionen übernehmen. „Handover/Fusion“ nutzt sowohl GNSS als auch UWB-Werte, um eine einheitliche fusionierte Position im WGS84 Koordinatensystem dem Container „Regler“ bereitzustellen. Der Container „Gateway“ war als Protokoll- und Schnittstellenadapter zwischen der Lok-Datenschnittstelle und dem Zugregler angedacht, da zum Start des Projektes noch keine

Spezifikation der Datenschnittstelle vorhanden war. Außerdem waren Safety- und Security Funktionen geplant, wie Validieren der eingehenden Nachrichten oder Prüfung auf Plausibilität. Im Container „Regler“ läuft der Regler der Professur RTSD. Zuletzt werden die Ausgangsdaten des Reglers wieder über die Lok-Datenschnittstelle in die Aktorik der Lok zur Beeinflussung der Fahrhebelstellung zum Beschleunigen und Bremsen gesendet.

Docker wurde als Container-Laufzeitumgebung gewählt, um eine klare Kapselung der Softwarekomponenten zu ermöglichen und somit störungsfreie, reproduzierbare Ausführung der sicherheitsrelevanten Module zu gewährleisten. Zudem handelt es sich bei Docker um einen in der Industrie breit anerkannten Branchenstandard, der eine konsistente und robuste Grundlage für containerisierte Anwendungen bietet.

Zur Kommunikation zwischen den einzelnen Containern wurde sich auf den MQTT-Standard (Message Queue Telemetry Transport) geeinigt. Dies ist ein Client-Server-Protokoll, welches auf TCP basiert und ein hohes Maß an Zuverlässigkeit der Datenübertragung bietet. Verschiedene Quality of Service Stufen definieren dabei, ob bei Verbindungsunterbrechung ein neuer Senderversuch unternommen wird. Der Server wird bei MQTT-Kommunikation auch Broker genannt und wurde auf dem für ELFE zur Verfügung gestellten Testrechner (Baugleich zum später eingesetzten Lok-Rechner) durch die Professur SSE installiert und konfiguriert.

Die Professur RTSD beschäftigte sich zuerst mit einer Literaturrecherche zur Bremskraftübertragung sowie zu Bremsvorgängen. Dabei konnte Wissen aus einem Seminar genutzt werden, welches im Rahmen des Vorgängerprojektes EETCM (Energieeffiziente und robuste Antriebsregelung von Zügen) veranstaltet wurde und sich mit dem Bremsen beschäftigte. Dort wurden die Projektteilnehmer auf verschiedene Aspekte des Bremsvorgangs sensibilisiert. Außerdem wurde durch die Professur RTSD eine Masterarbeit betreut, deren erster Bestandteil die Herleitung eines Bremsmodells beinhaltete, welches den Bremsvorgang mathematisch-physikalisch charakterisiert. Nach mehreren internen Besprechungen, in denen über die Systemgrenzen und zulässige Modellvereinfachungen gesprochen wurden, wurde folgendes Bremsmodell für die Aufgaben des Projektes ausgewählt:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{a}}_c(t) &= -\frac{1}{\tau} \mathbf{a}_c(t) + \frac{1}{\tau} \mathbf{a}_t(t - T_d), \\ \dot{\mathbf{v}}(t) &= \mathbf{a}_c(t) + \mathbf{a}_r(t), \\ \dot{\mathbf{s}}(t) &= \mathbf{v}(t).\end{aligned}$$

Dabei ist $\mathbf{a}_c(t)$ die geregelte Beschleunigung des Bremssystems, $\mathbf{a}_t(t)$ die Zielbeschleunigung des Bremsbefehls und $\mathbf{a}_r(t) = \alpha u(t) + \beta$ die Beschleunigung, welche durch Luftwiderstand erzielt wird. Als Stellgröße $u(t)$ ist die Stellung des Fahr-Brems-Hebels gegeben. Die Parameter τ , T_d , α , β wurden dabei durch eine Parameteridentifikation ermittelt. Da keine realen Messdaten zur Verfügung standen, wurden mit einem früheren Modell der Zugdynamik Messwerte erzeugt und daran die Identifikation der Parameter des Bremssystems durchgeführt. Das exemplarische Vorgehen ist in Abbildung 2 dargestellt.

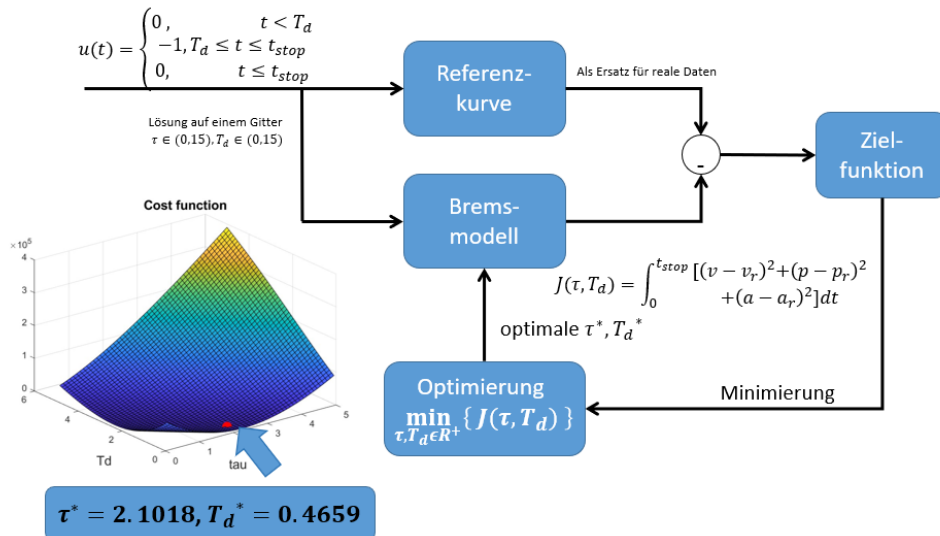


Abbildung 2: Identifikation der erforderlichen Parameter des Bremsmodells basierend auf einer Referenz

Das Bremsmodell ergänzt dabei das im Vorgängerprojekt entwickelte Modell der Zugdynamik, welches folgendermaßen gegeben ist:

$$\dot{x} = \begin{pmatrix} x_2 \\ -\frac{F_r(x)}{m} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{k_1 e^{-k_2 x_2} + k_3}{m} \end{pmatrix} u$$

Dieses Modell resultierte aus einer Bilanzierung der Kräfte, nämlich der Antriebskraft des Motors als antreibende Kraft (im Vektor, der mit der Fahrhebelstellung als Eingang multipliziert wird) und der Widerstandskraft als abbremsende Kraft (im ersten Vektor).

Das hergeleitete Bremsmodell wurde in der Simulationsumgebung MATLAB/Simulink hinterlegt, um es für folgende Bearbeitungsschritte nutzen zu können – siehe Abbildung 3 (schon mit eingebautem Regler). Auf die Bestandteile der Grafik wird in AP3 eingegangen.

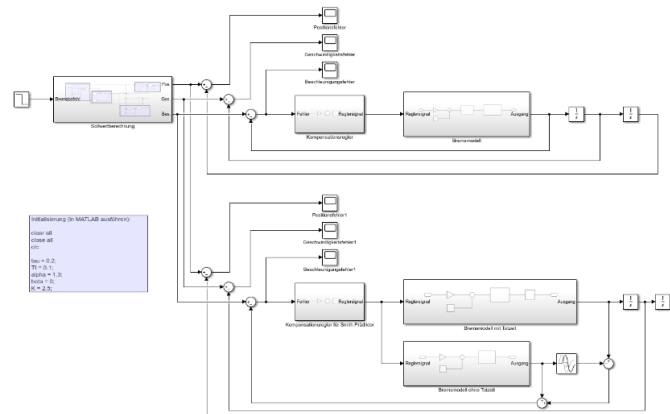


Abbildung 3: Einbindung des Bremsmodells in Simulink mit zwei Reglern

Die Professur SSE startete mit einer Literaturrecherche zum Thema Funkreichweite bei UWB-Systemen in bahntypischen Umgebungen. Dabei wurden zunächst untersucht, wie „bahntypische Umgebungen“ charakterisiert sind. Insbesondere Orte, wie Hauptbahnhöfe mit großen Deckenhöhen, Werkshallen oder auch große Betriebsgelände, stellen dabei eine Herausforderung für die Reichweite von UWB-Ankern dar. Um den Installationsaufwand und die Kosten möglichst gering

zu halten, ist eine Steigerung der maximalen Reichweite wichtig. Parameter, welche die Reichweite beeinflussen können, wurden recherchiert. Diese Untersuchungen dienten der Abschätzung der benötigten Dichte von UWB-Ankern in den geplanten Versuchsszenarien.

Ein weiterer Kernaspekt war die Recherche zu Manipulationsmöglichkeiten für Funkortungsanwendungen und den einsetzbaren Sicherheitstechniken im Funk. Zunächst wurde das Global Navigation Satellite System (GNSS) untersucht. Im Gegensatz zum militärischen GPS, ist das zivil nutzbare GPS nicht verschlüsselt oder durch Authentifizierung geschützt. Die meisten GNSS-Manipulationsverfahren zielen auf einen gestörten oder veränderten Signalempfang ab, welcher entweder die Positionsbestimmung unmöglich macht oder verfälscht. Neben diesen „gewollten“ Einflüssen gibt es aber auch ungewollte Einflüsse, wie Störungen der Erdatmosphäre, welche berücksichtigt werden müssen. Genauso wie GNSS beruhen auch viele heutzutage gängige UWB-Lokalisierungssysteme auf Trilateration zur Positionsbestimmung. Außerdem besitzt das im Projekt genutzt System der Pinpoint GmbH eine ähnliche Systemarchitektur wie GNSS. Aus diesen Gründen gelten viele Aussagen und Angriffsvektoren auf dem GNSS auch für UWB-Systeme. Jedoch gibt es hier auch noch andere Möglichkeiten, da zum Beispiel der physikalische Zugang zu den „Satelliten“ (UWB-Anker) denkbar ist. Um sich gegen diese Manipulations- und Angriffsmöglichkeiten zu schützen, gibt es mehrere Sicherheitstechniken, welche auf verschiedenen Systemebenen ansetzen. Gängige Verfahren sind beispielsweise das Receiver Autonomous Integrity Monitoring (RAIM) des GNSS, welches in wissenschaftlichen Veröffentlichungen auch auf UWB-Systeme versucht wird anzuwenden. Erkenntnisse aus der Literaturrecherche wurden im Oktober 2024 auf einer Dienstreise zum FiRa („Fine Ranging“) Konsortium Plenary Meeting in Osaka (Japan) weiter erörtert, diskutiert und Erfahrungen mit FiRa Mitgliedern (unter anderem führende UWB-Entwickler von Infineon, HID Global und Qorvo) ausgetauscht. Diese Erkenntnisse flossen in die Weiterentwicklung des UWB-Sicherheitskonzeptes ein.

Ein weiteres Ziel der Professur SSE war es, geeignete Qualitätstechniken zur Bewertung von Software- und Systemsicherheit im Bahnumfeld zu finden. Es existieren einige Eigenschaften, die die Qualität von Software definieren, unter anderem Zuverlässigkeit oder Sicherheit. Es ist ein systematisches Vorgehen notwendig, um die Softwarequalität sicherzustellen, welches unter anderem durch Normen festgelegt ist. In Abbildung 4 sind die vorausgegangen und aktuellen Normen für Software im Bahnkontext ersichtlich. Hinweis: Die Norm 50716 ist mittlerweile gültig.

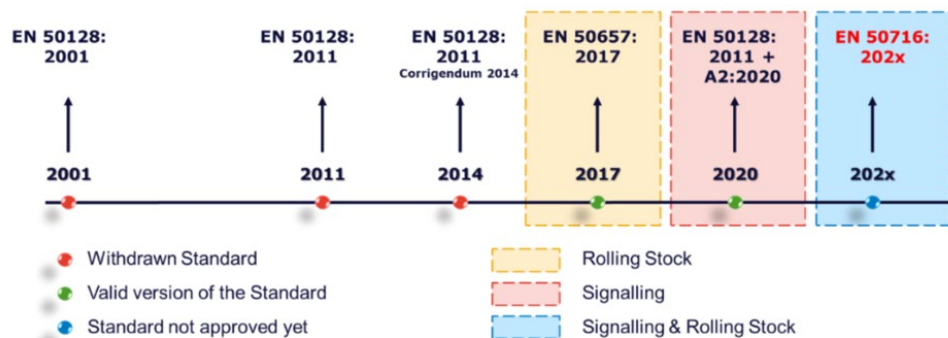


Abbildung 4: Zeitstrahl der Software-Bahnnormen (Lucia Capogna. „Software in Railway Applications“. In: The Safety-Critical Systems Club Newsletter Volume 31.3.)

Die aktuell gültige Norm DIN EN 50716 ist für Software auf Schienenfahrzeugen und für die Signalanlagen gleichermaßen gültig und somit für die Untersuchungen im Projekt ELFE relevant. Die

Norm definiert verschiedene Softwaresicherungskonzepte, wie Softwaretest oder Softwarevalidierung, und schreibt die Schritte der Software-Entwicklung vor. Einzelne Techniken und Maßnahmen werden je nach SIL (Sicherheits-Integritätslevel, 0-4) empfohlen (recommended) oder sogar vorgeschrieben (mandatory). Es wurde ein Konzept aufgestellt, wie die im Projekt entstehenden oder beteiligten Softwarekomponenten der Systemarchitektur aus Abbildung 1 untersucht werden können. Es sind bereits Teilkomponenten vorhanden, wie die Software der Pinpoint GmbH oder der DRAIVE GmbH. Die Norm gilt hier jedoch auch für bereits bestehende Software, welche je nach SIL unterschiedlichen Anforderungen unterliegt. Das erstellte Konzept kann zur messtechnischen Beurteilung der Qualität der im Projekt entstehenden Software dienen.

AP2: Versuchskonzeption und experimentelle Datengewinnung

Dieses Arbeitspaket beinhaltet die Funktionalitätssicherstellung der Lokalisierungssysteme sowie die Vertiefung des Systemverständnisses von Bremsvorgängen und die Erzeugung von Referenzdatensätzen als Grundlage zur Algorithmenentwicklung.

Die Professur SSE nutzte die Recherche aus AP 1 als Grundlage zur Untersuchung der Funkreichweite von UWB im Campusumfeld. In einem realen Aufbau in einem langen Gang der TU Chemnitz wurde mit Hilfe einer Messreihe die Reichweite und Genauigkeit von UWB-Entfernungsmessungen (TWR: Two Way Ranging) unter realen Bedingungen getestet und die Auswirkung verschiedener einstellbarer UWB-Parameter (UWB-PHY) untersucht. Die Ergebnisse wurden im September 2024 auf der IEEE International System-on-Chip (SOCC) Konferenz in Dresden präsentiert und diskutiert. Die Veröffentlichung ist unter folgendem Link einsehbar: <https://doi.org/10.1109/SOCC62300.2024.10737815>. Es konnten Reichweiten von über 125 Metern zwischen zwei UWB-Ankern erreicht werden. Die mittlere Abweichung der Entfernungsmessung betrug 25cm. Abbildung 5 zeigt beispielhaft den Parameter Datenrate. Es ist ersichtlich, dass es Parameterkonfigurationen gibt, welche über die gesamte Messdistanz eine Zuverlässigkeit von 1 (100%) haben. Andere hingegen weisen maximale Reichweiten von nur 75m auf oder brechen bei 25m ein. Dies kann mit der Degradation der UWB-Funkverbindung bei Überlagerung mehrerer Reflexionspfade erklärt werden. Die Ergebnisse dienen ebenso der Abschätzung der benötigten Dichte von UWB-Ankern in den geplanten Versuchsszenarien.

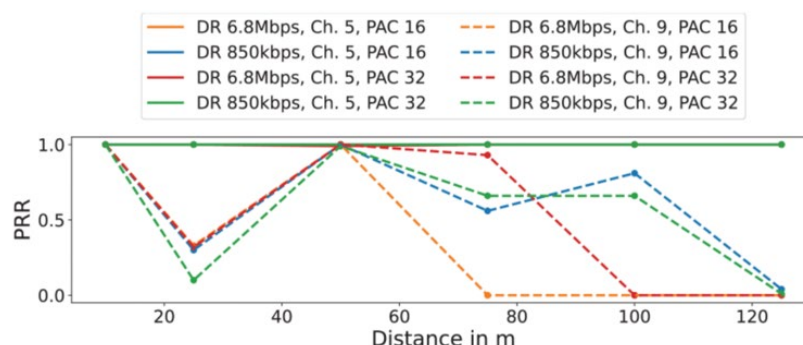


Abbildung 5: Einfluss des Parameters Datenrate (DR) auf die Zuverlässigkeit der UWB-Funkkommunikation.

Ein wichtiger Aspekt der in AP 1 untersuchten Softwaresicherungskonzepte sind Softwaretests. Das Testen von Software allein ist jedoch nicht ausreichend, da keine Aussage getroffen werden kann, wie viel Prozent des Codes überhaupt durch die Tests abgedeckt ist. Dies wird auch Testabdeckung genannt. Die Norm DIN EN 50716 schreibt für SIL-4 Systeme explizite Level an Test-

abdeckung vor. Um die Machbarkeit zu zeigen, wurden einige Funktionen der zum Einsatz kommenden Software getestet und mit verschiedenen Code-Coverage Tools die Testabdeckung bestimmt. Python Code konnte mit einer kostenlosen Test-Suite bestehend aus pytest und Coverage.py getestet werden. C++ Code wurde mit Hilfe einer Code-Coverage Software (BullseyeCoverage, <https://www.bullseye.com/>) untersucht. Der Regler der Professur RTSD, welcher in MATLAB/Simulink entwickelt wurde, konnte mit einer Kombination aus der Requirements Toolbox, Simulink Test und Simulink Coverage getestet werden.

Im Anschluss an die vorangegangenen Untersuchungen wurden die praktischen Erprobungsschritte vorbereitet. Zuerst erfolgte am 06.12.2023 die Besichtigung einer Waschhalle, die als Testumgebung fungierte. Dort wurden alle Projektpartner für das Thema und die Projektaufgaben sensibilisiert. Abbildung 6 zeigt den Blick in die Waschhalle. Es ist ersichtlich, dass die Decke und Wände aus massivem Material bestehen, was auf eine sehr schlechte GNSS-Performance vermuten ließ.



Abbildung 6: Waschhalle mit dem SIEMENS Desiro BR 642

In den Nachfolgemonaten erfolgte eine Abstimmung mit den Projektpartnern zur Vorbereitung verschiedener Testfahrten. Dazu wurde erfolgte ein Austausch über erforderliche Szenarien, welche vom Triebfahrzeugführer durchgeführt wurden, um Messwerte zu erhalten. Die Tests bzw. Testfahrten selbst haben am 15.06.2024, 14.09.2024, 15.03.2025 und 15.05.2025 stattgefunden. Bei den Testfahrten wurde die Einfahrt in die Waschhalle und in den Chemnitzer Hauptbahnhof mehrere Male durchgeführt, um Messdaten zur GNSS- und UWB-Abdeckung zu erhalten. Ebenso wurde der Abschnitt von der Waschhalle bis kurz vor den Bahnhof Chemnitz Süd zurückgelegt, um Daten bei höheren Geschwindigkeiten aufzuzeichnen. Auf dieser Strecke war auch die Fahrt durch einen kurzen Tunnel dabei, was insbesondere für die Auswertung der GNSS-Abdeckung und Genauigkeit vom Vorteil war.

Erkenntnisse aus der genannten Veröffentlichung der Professur SSE im AP 1 wurden in der Bahn-umgebung einer Waschhalle erneut untersucht und verifiziert. Die Erkenntnisse der vorangegangenen Untersuchung zur Reichweitenerhöhung wurden hier eingebracht. Dabei wurden auch Messreihen aufgenommen, während der Zug sich bewegt. Es wurde untersucht, ob der genutzte Triebzug bei der Ein- oder Ausfahrt aus der Halle einen Einfluss auf die UWB-Funkkommunikation hat. Auswertungen zeigen, dass die Anbringung der Sensorik auf dem Zugdach ideal ist, da somit eine bestmögliche Sichtbarkeit zu den an den Hallenwänden auf ca. 4,8 Metern angebrachten

UWB-Ankern erreicht wird. Die UWB-Signale wurden bei Messungen im Zug selbst nur stark gedämpft empfangen, was in einer sprunghaften und ungenauen Position resultierte. Auch bei Messungen „durch“ den Zug hindurch (Zug als Hindernis zwischen zwei UWB-Transceivern) wurde festgestellt, dass die Signale teilweise komplett reflektiert/absorbiert wurden.

Die Professur RTSD kümmerte sich im Anschluss der Messfahrten um die Auswertung der Experimente. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse konnten stets genutzt werden, um die folgenden Messfahrten zu verbessern, wie später deutlich wird. So konnte beispielsweise gezeigt werden, dass mit Standardmethoden der Ortung keine exakte Lokalisierung möglich ist, wie in Abbildung 7 dargestellt, was die Bedeutung des Vorhabens im Projekt unterstreicht. Dabei wurde die App Phypox genutzt, um mit dem Mobiltelefon Beschleunigungs-, Geschwindigkeits- und Positionsdaten aufzunehmen.

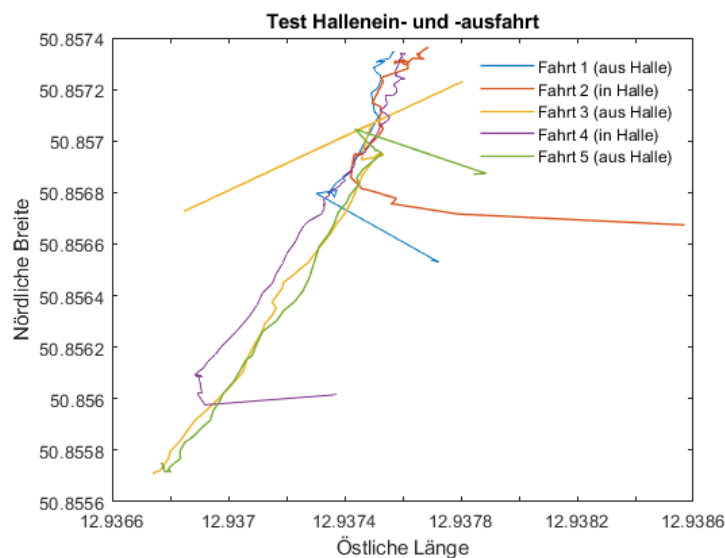


Abbildung 7: Positionsdaten bei der Waschhallenein- und -ausfahrt

Die geplante Anpassung der in AP1 hergeleiteten Modelle stellte jedoch ein Problem dar. Ein Grund dafür ist die verspätete Bereitstellung des Forschungszuges, der über die erforderliche Sensorik verfügt. Im Zuge dessen wurde zuerst mit einem Mobiltelefon Messdaten (Position, Geschwindigkeit, Beschleunigung, Streckenneigung usw.) aufgenommen. Dabei konnte jedoch nicht die Fahrhebelposition aufgezeichnet werden, welche als Eingang jedoch wesentlich für die Zugdynamik ist. Ohne sie konnten die Modelle nicht verifiziert werden. Daher wurde eine Anordnung aus sechs Sensoren erstellt. Dabei wurden drei Sensoren am Fahrhebel und die drei verbleibende am Fahrerpult befestigt. Genutzt wurden Beschleunigungssensoren drei verschiedener Hersteller, um bei einem Sensorausfall eine gewisse Redundanz zu besitzen und den Sensor mit der höchsten Qualität zu ermitteln. Die temporäre Installation im Zug mit je einem Sensor ist in Abbildung 8 dargestellt.

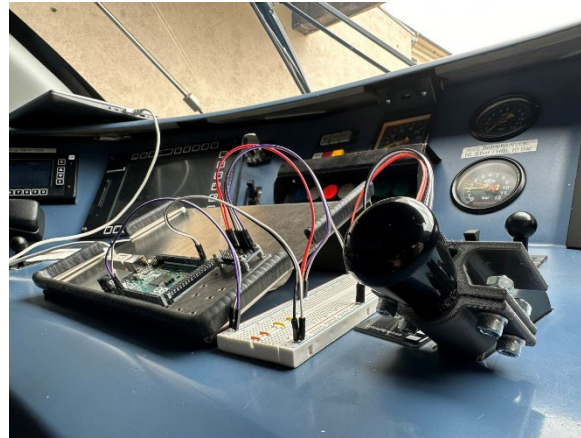


Abbildung 8: Einbau der entwickelten Sensoranordnung am Fahrhebel

Eine Auswertung der Sensordaten zeigte, dass die benötigte Fahrhebelstellung nicht zufriedenstellend geschätzt werden konnte. Daher wurde zur nächsten Testfahrt ein Potentiometer genutzt, welches die Stellung des Fahrhebels als Signal ausgibt. Diese Installation misst den eingestellten Fahrhebel zuverlässig. Ein exemplarischer Verlauf, der auch zur Kalibrierung genutzt wurde, ist in Abbildung 9 dargestellt.

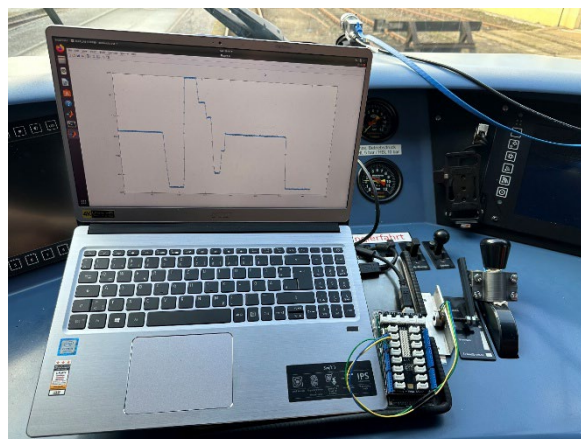


Abbildung 9: Einbau des Potentiometers zur Bestimmung der Fahrhebelposition

Danach wurden die Verläufe der Neigung des Fahrhebels und der aufgezeichneten Geschwindigkeiten in MATLAB zusammengeführt. Diese sind in Abbildung 10 dargestellt. Dabei wurden die Positionsdaten der UWB-Messung (blau) mit den Messungen verglichen, welche mit dem Mobiltelefon aufgezeichnet wurden (schwarz). Hier ist erkennbar, dass die Messungen mit dem Mobiltelefon teilweise ausfallen, die UWB-Messung aber korrekt arbeitet. Anschließend wurde der Fahrhebel in der gleichen Abbildung hinterlegt (rot). Es konnte festgestellt werden, dass an manchen Stellen eine Übereinstimmung des Verhaltens vorliegt, also eine Änderung des Fahrhebels zu einer proportionalen Beschleunigung bzw. zu einem Geschwindigkeitsanstieg führt, jedoch zeigte sich aufgrund der nicht möglichen Synchronisation aller Sensoren ein zeitlicher Versatz. Aus diesem Grund konnten die Daten zwar nicht zur Modellverifikation genutzt werden, jedoch zum Reglerentwurf, wie es nun in AP3 beschrieben wird.

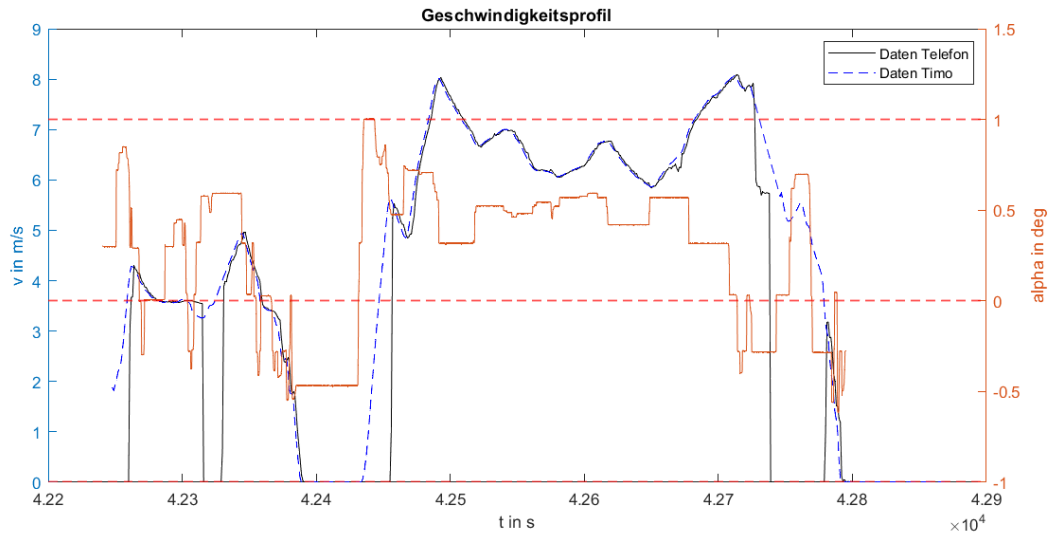


Abbildung 10: Vergleich verschiedener Geschwindigkeitsmessungen mit der ermittelten Fahrhebelposition

AP3: Softwareentwicklung

Der Beitrag der Professur RTSD innerhalb des AP 3 beinhaltet den Bremsregler. Als Vorbereitung dafür erfolgte zunächst eine Auswahl möglicher Bremskurven. Dabei wurden u. a. die Bremskurven aus den Messfahrten mit den hergeleiteten Modellen simulierte Bremskurven verglichen. Dabei wurde auf sicherheitsrelevante Beschränkungen geachtet, wie etwa eine Maximalbeschleunigung (und somit auch Abbremsung) von $1,3 \frac{m}{s^2}$. Anschließend wurde die in Abbildung 11 dargestellte Kurve als Referenzwert und Grundlage für den Reglerentwurf genutzt. Die Kurve ergab sich aus einem Referenzmodell, bei dem aus einer Geschwindigkeit von $20 \frac{m}{s}$ abgebremst wurde.

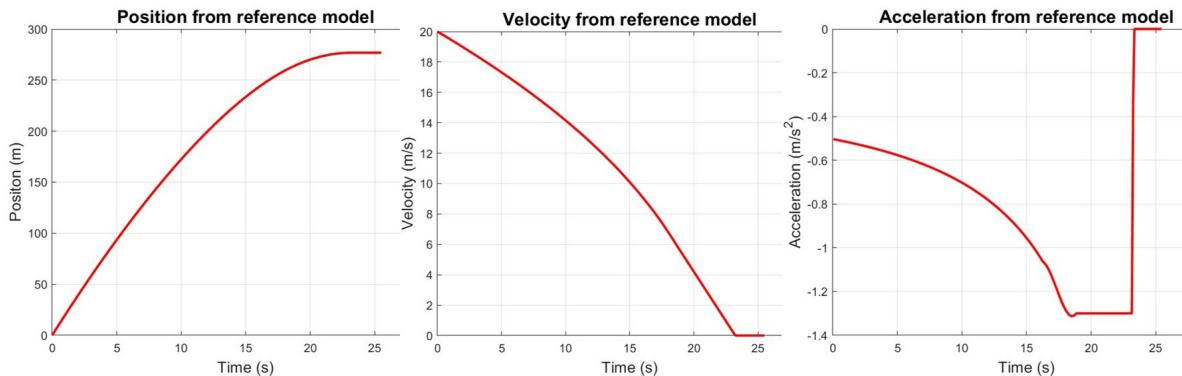


Abbildung 11: Ausgewählte Bremskurve als Referenz für den Regler

Um einen Vergleich treffen zu können, wurden zwei verschiedene Regler für das Bremsmodell entwickelt. Dies erfolgte im Rahmen einer Masterarbeit, die durch die Professur RTSD betreut wurde. Als Reglerstruktur wurde zum einen ein modellprädiktiver Regler (MPC) und zum anderen ein PI Regler verwendet. Beide Regler wurden in MATLAB und Simulink implementiert.

Die Parameter des PI Reglers wurden basierend auf verschiedenen Betrachtungen dimensioniert. Dabei wurde die Reglerstruktur so gewählt, dass stets Stabilität des geschlossenen Regelkreises gewährleistet wird. Die Pole des geschlossenen Regelkreises wurden durch ein Kompensationsverfahren auf zwei negative nichtimaginäre Werte gelegt, um Schwingungen zu unterbinden.

Dieser Ansatz wurde bereits in Abbildung 3 in AP1 gezeigt. Dabei wurde auch die Totzeit berücksichtigt, also der zeitliche Versatz zwischen der Abgabe des Bremsbefehls und der tatsächlichen Wirkung. Diese Totzeit wurde mit einem zusätzlichen Smith-Prädiktor im Regler berücksichtigt. Da sich jedoch kein signifikanter Unterschied zwischen dem Bremsmodell mit und ohne Totzeit ergab, konnte die Totzeit aus Gründen der Modellvereinfachung durch eine einfache Padé-Approximation eingebunden werden. Abbildung 12 zeigt den Positionsfehler und Geschwindigkeitsfehler (schwarz). Außerdem wurden Robustheitseigenschaften des Reglers untersucht. Dazu wurde eine nichtlineare Störung angelegt (rot). Es lässt sich erkennen, dass der Positionsfehler in beiden Fällen etwa drei Meter beträgt, was für die vorliegende Aufgabe ungenügend ist. Daher müsste noch eine Verbesserung an den Reglerparametern erfolgen, um den Fehler zu minimieren.

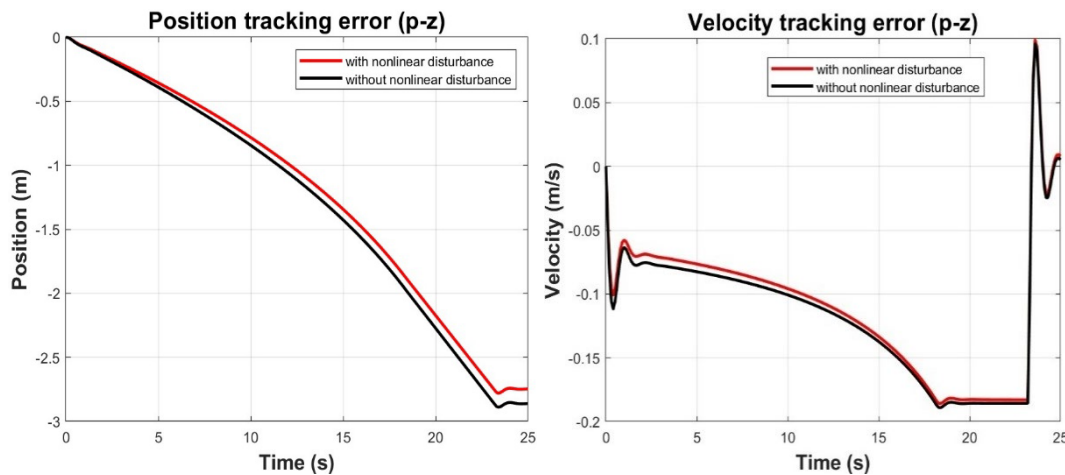


Abbildung 12: Ergebnisse des ersten Reglers (Kompensationsregler)

Dem entsprechend wurde der zweite Regler (MPC) entworfen. Dabei erfolgte zuerst eine Diskretisierung des betrachteten Modells bestehend aus Position, Geschwindigkeit, Beschleunigung und Ruck. Das zugehörige Optimalsteuerungsproblem ist folgendermaßen gegeben:

$$\min_{u_d[1], u_d[2], \dots, u_d[N]} J(X) = Q_1(p_{\text{Dis}}[N] - p_{\text{Ziel}})^2 + \sum_{i=1}^N Q_2(p_{\text{Dis}}[i] - p_{\text{Ref}}[i])^2 + Q_3(v_{\text{Dis}}[i] - v_{\text{Ref}}[i])^2$$

$$\text{s. t. } v_{\text{Dis}}[i] \geq 0, \quad -1.3 \leq a_{\text{Dis}}[i] \leq 1.3, \quad u_{\text{Dis}} \in [-1, 1] \quad \forall i = 1, \dots, N$$

Die Kostenfunktion $J(X)$ bestraft Abweichungen in jedem Zeitschritt i der diskretisierten Zustände p_{Dis} und v_{Dis} von der Referenztrajektorie (Position p_{Ref} und Geschwindigkeit v_{Ref}) sowie von der Zielposition p_{Ziel} . Dadurch bleibt der Zug nah an der gewünschten Referenz, welche durch die Bremskurve vorgegeben ist. Eine Gewichtung der Komponenten erfolgt durch die Q_j . Der Algorithmus sorgt dafür, dass das System über die nächsten N Zeitschritte gelöst wird und basierend auf dieser Prädiktion die optimale Fahrhebelstellung ermittelt wird. Als Nebenbedingungen soll die Geschwindigkeit stets größer als null sein, die maximale Beschleunigung auf $1,3 \frac{m}{s^2}$ begrenzt werden (dient dem Komfort der Fahrgäste) sowie der Fahrhebel zwischen -100% und 100% liegen. Abbildung 13 zeigt die Positions- und Geschwindigkeitsfehler bei unterschiedlichen Bremskurven, nämlich für eine Vollbremsung (Fahrhebelstellung -100%) und eine sanftere Bremsung (Fahrhebelstellung -80%). In beiden Fällen sorgt der Regler für einen Positionsfehler von unter 20 Zentimetern, was eine signifikante Verbesserung zum ersten Regler mit sich bringt.

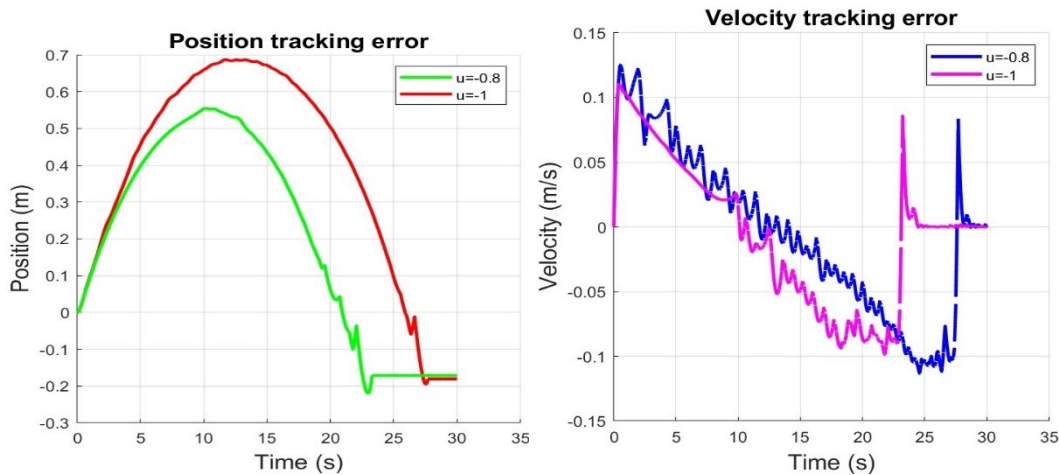


Abbildung 13: Ergebnisse zweiten ersten Reglers (Modellprädiktiver Regler)

Ein dritter Regler wurde mit dem LQR Ansatz entworfen. Dabei wird das nichtlineare Modell an einer Folge von Referenzpunkten linearisiert und für das resultierende Modell ein linearer Regler entworfen. Die Ergebnisse werden in AP4 an echten Messdaten gezeigt.

In Zusammenarbeit mit Pinpoint, DRAIVE und den beiden Professuren RTSD und SSE wurde die Handover-Algorithmik entwickelt. Dabei war das Ziel bei der Ein- und Ausfahrt eine möglichst lückenlose Position ohne Sprünge bereitzustellen. Eine detaillierte Ausführung dazu steht im Abschlussbericht der Pinpoint GmbH.

Im AP 3 wurde durch die Professur SSE eine Simulations-Software entwickelt, welche Bereiche auf einer Karte markiert, in denen von GNSS- und/oder UWB-Empfang ausgegangen werden kann. Dies wurde als Cross-Plattform-Applikation umgesetzt, um eine möglichst geringe Einschränkung des Betriebssystems und somit höchste Flexibilität gewährleisten zu können. Die App basiert auf Electron.js als JavaScript-basiertes App-Framework, React.js als Front-End Framework, und auf Three.js als 3D JavaScript Framework. Dies kann als Windows, MacOS und Linux Applikation gebaut und bereitgestellt werden. Abbildung 14 zeigt einen Screenshot der Applikation.

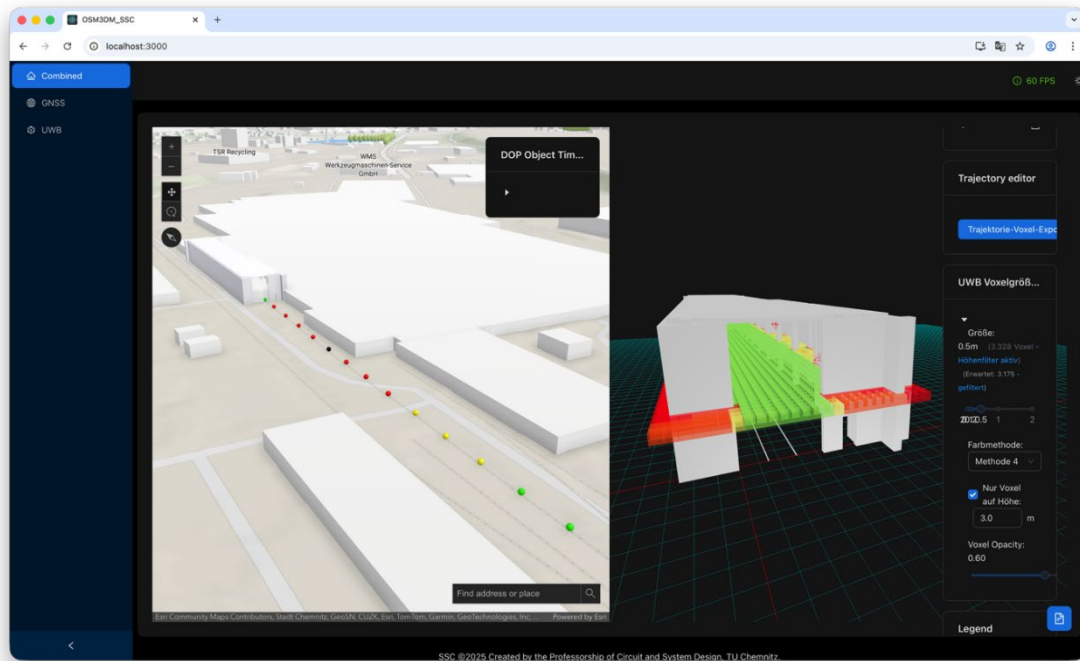


Abbildung 14: Screenshot der entwickelten Applikation

Auf der linken Seite ist die Außenwelt mit der GNSS-Abdeckungssimulation zu sehen. Die Punkte, welche sich von grün (gut) über rot bis hin zu schwarz (schlecht) verfärben stellen die Dilution of Precision (DOP) des GNSS dar. Ein grüner Punkt bedeutet bestmögliche Empfangsbedingungen und Satellitenkonstellationen, was auf eine gute Abdeckung und GNSS-Genauigkeit schließen lässt. Außerdem wurde die Waschhalle durch die Professur SSE in 3D modelliert und kann somit in die Weltkarte eingesetzt werden. Es ist ersichtlich, dass dies eine weitaus detailgetreuere Abbildung der Waschhalle ermöglicht, als dies in den Kartendaten vorhanden war. Außerdem wird auch ein HD-DEM (high definition digital elevation model) genutzt, um die Abschattung von Gebäuden und anderen Hindernissen (z. B. Bäume) in die Berechnung des DOP einfließen zu lassen. Die rechte Seite stellt die Innenwelt dar und nutzt die modellierte Waschhalle als Grundlage. Der Raum im und um das Modell herum wird in Voxel (dreidimensionale Würfel) aufgeteilt. Die Größe der Voxel lässt sich durch den Benutzer einstellen. Die geplanten Positionen der Anker können aus der Planungssoftware von Pinpoint importiert werden. Nachdem die Anker im Raum platziert sind, folgt die Berechnung der UWB-Abdeckung. Es wurden vier verschiedene Algorithmen implementiert, um die Abdeckung berechnen zu können. Zwei Algorithmen basieren auf einem Freiraum-Dämpfungsmodell der UWB-Funkkommunikation. Dabei wird für jeden Voxel berechnet, wie viele Anker in Reichweite sind. Dies berücksichtigt jedoch weder die Abschattung durch Objekte, wie Wände, noch die Geometrie der Anker. Letzteres wird in Algorithmus 3 berücksichtigt. Hierbei wird für jeden Voxel neben der Freiraumdämpfung auch die Geometrie (ähnlich dem DOP-Konzept aus dem GNSS-Bereich) zur Berechnung der Abdeckung verwendet. Im letzten Algorithmus wird geschaut, ob eine direkte Sichtlinie (LOS: Line Of Sight) zwischen dem untersuchten Voxel und den Ankern besteht. Dies wurde mit Hilfe von Raycasting umgesetzt, wobei ein Strahl (Ray) vom Voxel zu den Ankern gesendet wird. Trifft dieser auf ein Hindernis im 3D-Modell (Wand, Säulen, Möbel, ...), so gilt diese Verbindung als NLOS (Non Line Of Sight) und wird nicht zur Abdeckungsberechnung genutzt. Ein Screenshot des Resultates dieser Algorithmik ist in Abbildung 15 dargestellt. Untersuchungen haben gezeigt, dass die Raycasting-basierte Berücksichtigung der Ab-

schattung von Ankern die beste Variante der implementierten Algorithmik darstellt. Eine Kombination aller implementierten Algorithmen würde wohlmöglich die besten Ergebnisse liefern, was jedoch im Projekt aus Zeitmangel nicht mehr umgesetzt werden konnte. Außerdem wurde ein Algorithmus implementiert, welcher die „idealen“ Ankerpositionen berechnet. Als Eingabe dient das 3D-modellierte Gebäude (hier die Waschhalle), wobei erneut der Raum in Voxel unterteilt wird. Weitere Parameter sind die Anzahl der Anker und die Höhe, wo diese platziert werden sollen. Die Platzierung ist durch einen iterativen „Greedy-Algorithmus“ implementiert. Dabei wird in jedem Schritt sukzessive der Ankerstandort ausgewählt, welcher die Sichtabdeckung des Voxel-Raums am stärksten verbessert, indem er Bereiche erschließt, die von den bisher platzierten Ankern noch nicht oder nur unzureichend erreicht wurden.

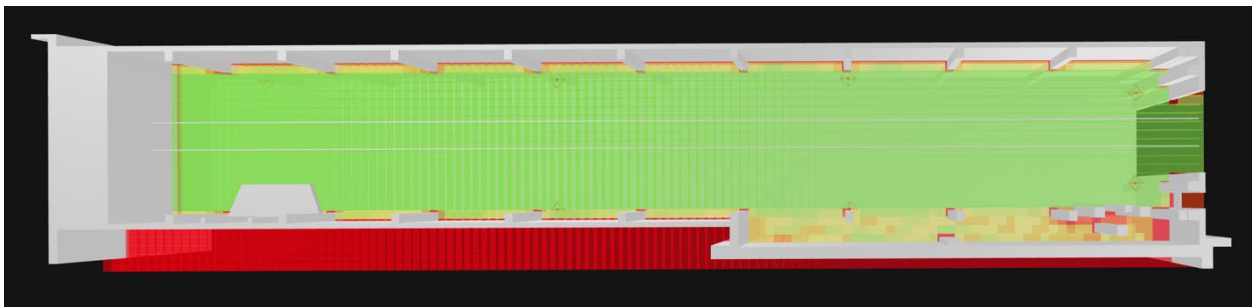


Abbildung 15: Ergebnis Raycasting Algorithmus im Modell der Waschhalle

Weiterhin wurden in AP 3 weitere Softwaretests (Integrationstests, Unittests) entwickelt, welche die geforderten Sicherheitslevel der Funktionen und Algorithmen gewährleisten sollten.

AP4: Implementierung und Integration

Ziel des Arbeitspakets ist die Integration im Gesamtsystem. Dabei stellt die noch nicht mögliche Bereitstellung des Forschungszuges eine große Schwierigkeit dar.

Gemeinsam mit den Projektpartnern wurde durch das ZWT die technischen Schnittstellen des Forschungszuges konzeptionell mit den Erfordernissen des Projektes abgeglichen. Hierfür wurde der Aufbau in Hard- und Software des Forschungszuges gemäß den Anforderungen aus dem Projekt untersucht. Dabei wurden u.a. die Kriterien, wie Laufzeit der Kommunikation (Latenz), die Laufzeit der Anwendung und die Reaktionszeit des Forschungszuges in die Betrachtungen einbezogen. Die Konzeption der Schnittstellen wurde mit allen Projektpartnern abgeglichen. So weit wie möglich, wurde die Konzeption am Forschungszug überprüft. Bei Tests bzw. Testfahrten wurde die Konzeption der Schnittstellen überprüft und die Messbedingungen analysiert. Die UWB-Module wurden auf dem Forschungszug montiert und ihre Funktionalität nachgewiesen. Leider konnte der Regler in der Projektlaufzeit nicht in Betrieb gesetzt werden, da die Schnittstelle im Zug selbst noch fertig implementiert werden konnte.

Aufgrund der noch nicht möglichen Bereitstellung des Forschungszuges wurde der Professur SSE als Alternative ein baugleicher Zugrechner bereitgestellt, der nach Fertigstellung des Forschungszuges in diesen integriert werden kann. Dieser Zugrechner wurde durch die Professur SSE so aufbereitet, dass alle Projektpartner darauf arbeiten können und ihre Docker Container testen können. Dafür wurde ein Linux Betriebssystem (Ubuntu) installiert und Nutzeraccounts für die Projektpartner eingerichtet. Außerdem wurde ein Remotezugriff mit ssh und RDP eingerichtet. Neben Docker (Engine) wurde auch MATLAB/Simulink, die Code-Coverage Software BullseyeCoverage und ein MQTT-Broker installiert.

Wie schon in AP 1 erwähnt, wurde sich bei Absprache zwischen den Projektpartnern auf eine Container-basierte Lösung mit Docker und eine Kommunikation mit MQTT geeinigt. Als Daten-drehscheibe wurde Redpanda Connect (ehemals Benthos) genutzt. Dies ist ein sogenannter Stream Processor, also eine Software, welche Datenstreams verarbeitet. Es folgt dem Konzept der Eingabe, Verarbeitung und Ausgabe. Die Daten aller Sensoren werden zunächst vom Redpanda Connect Container gesammelt, vorverarbeitet, wenn nötig umgewandelt und danach an die konfigurierten Docker Ziel-Container gesendet. In Abbildung 1 entspricht dies dem „Gateway“.

Die Professur SSE hat ausgehend von den Recherchen zu den Manipulationsmöglichkeiten aus AP 1 ein Konzept erstellt, wie Kriminalprävention umgesetzt und im Projekt sinnvoll eingebunden werden kann. Das Konzept basiert auf dem dauerhaften Monitoring des UWB-Netzwerkes. Ein Monitoring-Gerät der Pinpoint GmbH sendet Daten an eine InfluxDB-Datenbank. Ein Grafana-Dashboards dient als Plattform zur Kontrolle der Daten und auch zur Alarmierung. Geraten Messwerte aus ihrem Regelbereich, kann über sogenannte „notification policies“ über verschiedene Kontaktpunkte (E-Mail, MQTT, Slack, ...) eine Benachrichtigung versendet werden. Dies ermöglicht eine dauerhafte Überwachung des UWB-Netzwerkes. Weiterhin wurden die gewonnenen Erkenntnisse bezüglich der Funkreichweite von UWB-Positionierungssystemen und der Simulationssoftware, sowie der Softwarequalitätsansätze in das Projektzenario eingebunden.

Die Professur RTSD hat ihre Regelungsalgorithmen aus AP3 in den bereitgestellten Zugrechner eingebunden. Als erster Schritt wurde dabei die Kommunikation mit dem Zugrechner aufgebaut. Dies erfolgte in enger Zusammenarbeit mit der Professur SSE. In diesem Rahmen erfolgte auch ein abschließender Test, bei dem, ähnlich wie bei einer Testfahrt, aufgezeichnete und bereits fusionierte Positionsdaten vom Zugrechner gesendet wurden. Anschließend hat der Regler diese Daten eingelesen und basierend darauf den Streckeneingang, also die Fahrhebelstellung, berechnet. Diese wurde zuletzt zurück an den Zugrechner gesendet, wodurch der Kommunikationskreis geschlossen wurde. Anzumerken ist jedoch, dass die Fahrhebelstellung keinen Einfluss auf die bereitgestellten Messwerte hat, sodass an dieser Stelle nur die Kommunikation überprüft werden konnte. (Siehe Ablauf in Abbildung 1).

In einem zweiten Versuch wurden von den Projektpartnern bereitgestellte Positionsdaten einer Waschhalleneinfahrt und Bremsung als Referenzwerte für den Regler aufgefasst. Der linear-quadratische Regler (LQR; siehe AP3) berechnet die erforderliche Fahrhebelstellung und sorgt schlussendlich dafür, dass der Zug (zumindest in der Simulation) dieser Bremskurve folgt und somit zum Stillstand kommt. Abbildung 16 zeigt die Ergebnisse der Simulation. Die bereitgestellten Messwerte (blaue Verläufe) wurden zusätzlich vorverarbeitet, um Messwerte an äquidistanten Zeitpunkten zu erhalten. Dazu zählen eine Glättung und eine Interpolation (roter Verlauf). Die Verläufe der Position und der Geschwindigkeit unter Verwendung des entworfenen Reglers sind in blau dargestellt und zeigen am Ende eine Abweichung von etwa einem Zentimeter, was wiederum eine signifikante Verbesserung zu den beiden ersten Reglern aus AP3 darstellt.

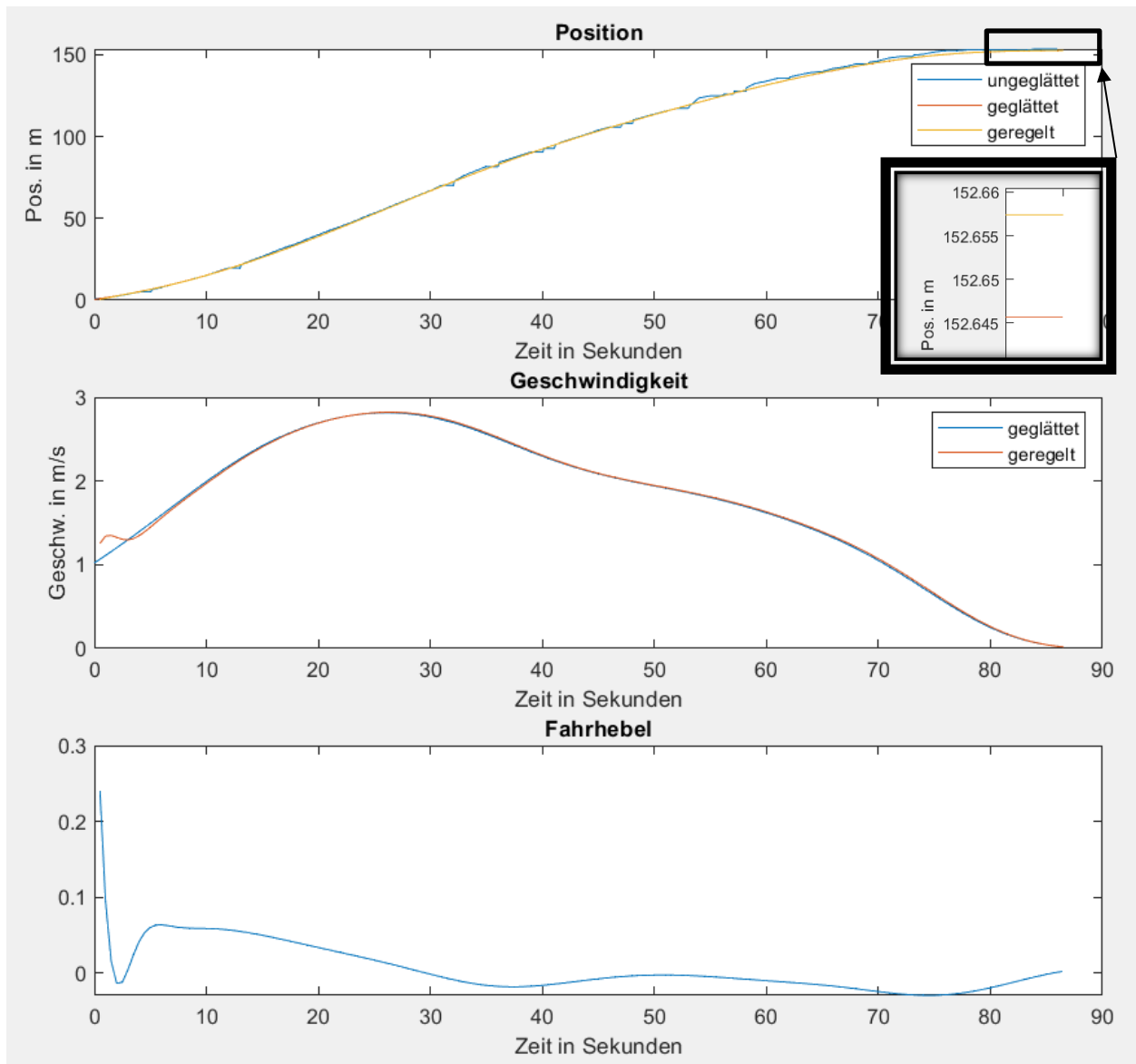


Abbildung 16: Ergebnisse des dritten Reglers (linear-quadratischer Regler) basierend auf echten Positionsdaten

In Abbildung 17 ist beispielhaft eine Einfahrt in die Waschhalle von der Testfahrt vom 15.03.2025 zu sehen. Auf der linken Seite ist eine Draufsicht der fusionierten Positionsdaten im WGS84 Koordinatensystem in orange dargestellt. Als Kartengrundlage dient OpenStreetMap. Die beiden Sterne markieren jeweils Start- und Endpunkt. Auf der rechten Seite ist der gleiche Ausschnitt mit Google Earth Satellitendaten dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die GNSS-Position bei der Vorbeifahrt an hohen Gebäuden beginnt von der eingezeichneten Gleislage abzuweichen. Innerhalb der Waschhalle ist die Position dann durch die Fusion mit der UWB-Position wieder gleisgenau. Abbildung 18 zeigt auf der linken Seite die Abweichung der GNSS-Position (blau) und der fusionierten Position (orange) innerhalb der Waschanlage deutlich. Auf der rechten Seite ist der Abstand zum Gleis (hier als ground truth angenommen) über die Messpunkte dargestellt. Deutlich zu sehen ist der Punkt, an dem der Zug in die Waschhalle einfährt, und die blaue GNSS-Position beginnt, stark (teilweise mehr als 10 Meter) von der ground truth abzuweichen.

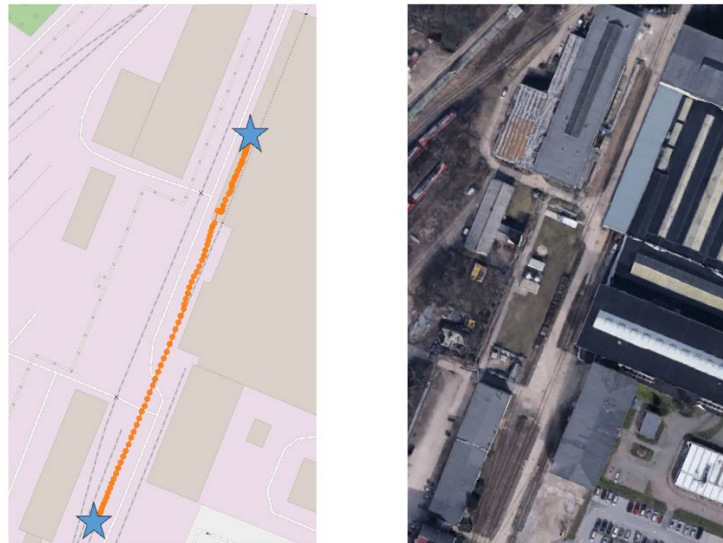


Abbildung 17: Daten einer Einfahrt in die Waschhalle

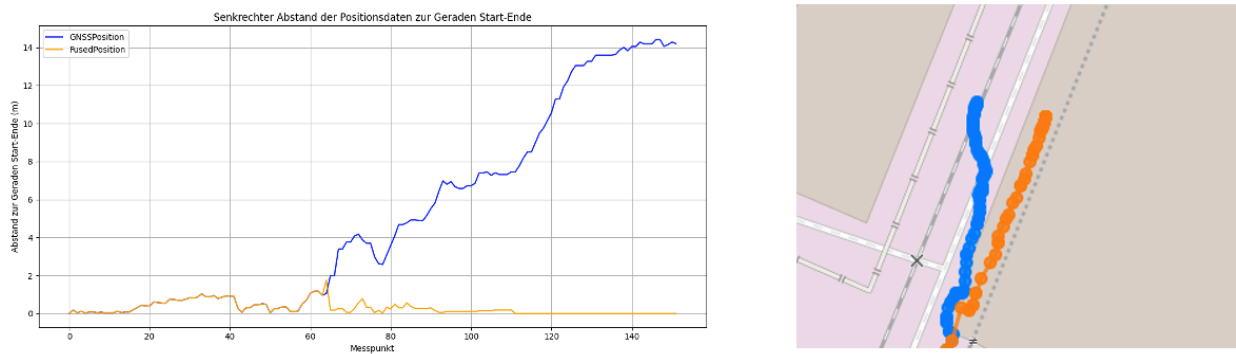


Abbildung 18: Abweichung der GNSS-Position (blau) und der fusionierten Position (orange) innerhalb der Waschhalle

AP5: Validierung und abschließende Tests

Dieses abschließende Arbeitspaket betrachtete verschiedene Tests, um die Funktionalität der entwickelten und implementierten Hardware und Software in Regelbetriebsszenarien zu testen.

Wie bereits im Antrag beschrieben, wird hier der Forschungszug benötigt, auf dem die Hard- und Software eingebunden wird. Da dieser in der Projektlaufzeit jedoch nicht zur Verfügung stand, konnte dieses AP nicht wie geplant abgeschlossen werden. Dadurch konnten auch die geplanten Feldversuche zur Funktionalitätsuntersuchung der Algorithmen nicht durchgeführt werden.

Die Professur SSE hat das aufgestellte Konzept aus AP4 auf mögliche Manipulationen getestet. So konnte unter anderem in einem Laboraufbau durch das UWB-Monitoring eine Manipulation an den UWB-Ankern festgestellt werden. Im Grafana-basierten Dashboard wurde eine Alarmierung bei Veränderung der Position von UWB-Ankern ausgelöst. Auch ein Ausfall eines Ankers konnte alarmiert werden. Weiterhin wurde ein Überblick erlangt, welche Schritte und Maßnahmen notwendig wären, würde das im AP 1 aufgestellte Konzept zur Bewertung und Sicherung der Softwarequalität auf das Gesamtsystem angewendet werden.

Die Professur SSE hat auch die in AP3 erstellte UWB-Simulationssoftware in realen Bedingungen getestet. Dazu wurde ein mobiler Roboter angeschafft, auf welchen ein Pinpoint UWB-Tag (Empfänger) befestigt wurde (siehe Abbildung 19). Dieser Roboter läuft mit ROS2 (Robot Operating System) und liefert durch einen Lidar-Sensor in Kombination mit einer SLAM-Pipeline (Simultaneous localization and mapping) eine hochgenaue ground truth (Grundwahrheit). Dabei erstellt der Roboter im ersten Schritt eine Karte der Umgebung, welche danach manuell auf die Grundrisskarte der UWB-Planungssoftware von Pinpoint gelegt und somit referenziert wurde. Diese Grundwahrheit diente dann als Referenzposition, um die Aussagekraft der UWB-Abdeckungssimulation zu bewerten.

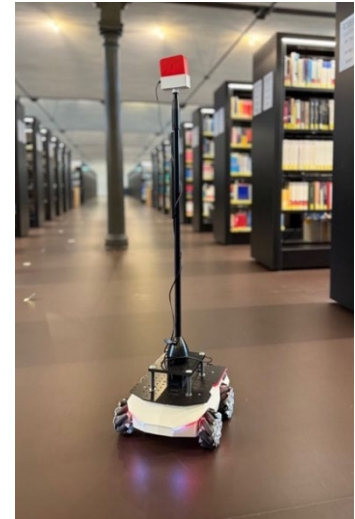


Abbildung 19: Mobiler Roboter mit UWB-Tag (rot)

Da im Projekt noch kein direkter Zugriff auf die Datenschnittstellen des Forschungszugs möglich war, konnten keine abschließenden Aussagen über die Stabilität des Gesamtsystems getroffen werden. Das Teilsystem, das unabhängig von den Zugdaten arbeitet, wurde jedoch erfolgreich in Labortests validiert. Zusätzlich wurden die vorgesehenen Schnittstellen des Gesamtsystems simulativ über das bestehende Docker-Testsystem geprüft, wodurch bestätigt werden konnte, dass die Implementierung grundsätzlich kompatibel zum Versuchszug ist.

Die Professur RTSD ist in diesem AP auf Simulationen ausgewichen, wie in AP4 beschrieben. Da in die Entwicklung zusätzlicher Sensoren (siehe AP2) viel Zeit geflossen ist, welche im Projekt nicht veranschlagt wurde, blieb zu Projektende keine Zeit für zusätzliche Betrachtungen, um AP5 aus Sicht der RTSD anders als beschrieben abzuschließen. Da jedoch sowohl der Regler mit realen Messdaten getestet als auch die Kommunikation mit dem Zugrechner überprüft werden konnten, stellt dies dennoch einen gelungenen Projektabschluss dar. Die entwickelten Verfahren können, beispielsweise in Folgeprojekten, in den Zug eingebunden werden.

2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Das Projekt wurde an der TU Chemnitz unter der Leitung des ZWT durchgeführt. Die technischen Arbeiten der Arbeitspakete seitens der TU fanden an der Professur RTSD und SSE statt. Die im Rahmen des Projektes entstandenen Ausgaben betragen insgesamt 421,380,36 € (zzgl. Projektpauschale i. H. v. 84.276,07 €). Sie liegen damit 86.513,30 € (ohne Projektpauschale) unter der bewilligten Zuwendung. Die Ausgaben wurden im Wesentlichen für Personalausgaben zur Beschäftigung wissenschaftlicher Mitarbeiter (360.570,55 €), für die Ausgaben zur Vergabe von Aufträgen (25.823€), für Mieten und Rechnerkosten (Tests/Testfahrten; 11.124,39) sowie für Beschäftigungsentgelte für wissenschaftliche Hilfskräfte (11.186,32€) verwendet. Weiterhin erfolgten Ausgaben für Gegenstände über 800 € (6.228,58 €), für sonstige allgemeine Verwaltungsausgaben (1.413 €) sowie für Dienstreisen (5.034,52 €).

Insbesondere die Positionen Personalausgaben (0812) und Mieten und Rechnerkosten (0834) fielen geringer aus als ursprünglich geplant. Insbesondere bei der Position 0834 wurden weniger Mittel benötigt, als ursprünglich geplant, da weniger Testfahrten durchgeführt wurden und diese kostengünstiger ausgefallen sind. Während der Projektlaufzeit wurden zudem Umwidmungen vorgenommen.

Für die Professur RTSD wurden Mittel für einen Journalbeitrag umgewidmet, der Projektergebnisse im Rahmen eines Fallbeispiels zeigt. Grundlage dafür ist ein Modell der Zugdynamik: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10811890>

Für die Professur SSE wurden Mittel für eine Dienstreise zum FiRa Plenary Meeting in Osaka (Japan) umgewidmet, wo Projektergebnisse direkt mit führenden Akteuren der internationalen UWB-Community diskutiert werden konnten. Vor Ort waren Personen vertreten, die die UWB-Standards entwickeln und in ihren Unternehmen weltweit ausrollen – etwa Verantwortliche von NXP, Qorvo, Apple, Infineon, HID Global, BMW und Cisco. Diese Mischung aus Industriepartnern und Sicherheits-Experten ist in Deutschland in dieser Form nicht zugänglich. Die Gespräche – sowohl in den Arbeitsgruppen als auch informell – lieferten konkrete Rückmeldungen zu Reichweite, Sicherheit und Standardisierung und bestätigten die Relevanz der im Projekt erzielten Ergebnisse. Zusätzlich wurden Mittel für die Beschaffung eines mobilen Roboters und UWB-Hardware umgewidmet. Der Roboter dient als **Emulation des Forschungszugs**, da er kompatible Schnittstellen bereitstellt und Tests unabhängig vom realen Fahrzeug ermöglicht. Insgesamt stärken die Umwidmungen die fachliche Qualität des Projekts und eröffnen neue Anschluss- und Verwertungsmöglichkeiten.

3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Die exakte Lokalisierung und das punktgenaue Bremsen stellen einen wichtigen ersten Schritt zum automatisierten Bahnbetrieb dar. Dies soll für die Triebfahrzeugführer (Tf) unterstützend wirken bzw. kann die Grundlage für eine mögliche Automatisierung der Aufgabe legen. Die im Projekt erzielten Erkenntnisse liefern eine Basis, um beispielsweise Bereitstellungsfahrten zu übernehmen. Für das Tanken und die Fahrt in die Waschhalle bzw. zu einem Abstellgleis wird täglich viel Zeit benötigt, diese Kapazitäten fehlen ggf. für die Personenbeförderung.

UWB-Funklokalisierung ist ein derzeit stark aufstrebender Bereich, der sich Dank vorschreitender Standardisierung, weiterer Anwendungsgebiete und steigender Marktdurchdringung in den nächsten Jahren immer weiter etablieren wird (<https://vulcanpost.com/prnewswire/next-generation-ultra-wideband-to-power-1-4-billion-devices-by-2030-as-ecosystem-matures-and-applications-diversify/>). Forschung zur Weiterentwicklung im Bereich UWB-Lokalisierung trägt nicht nur einer hochgenauen und zuverlässigen Ortung von Zügen bei, sondern findet auch zunehmend in anderen industriellen und humanen Gebieten Anwendung.

Die in diesem Projekt geleistete Forschung hebt die Innovationskraft der TU Chemnitz und der KMU in der Region Chemnitz-Erzgebirge hervor und unterstützt die Region zukunftsfähig und innovationsstark zu bleiben.

4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Die Professur RTSD hat Projekteinhalte in Lehrveranstaltungen eingebunden. Dadurch konnten Studierende auf die Themen des automatisierten Bahnbetriebs aufmerksam gemacht werden. Dadurch konnten potenzielle Mitarbeiter für die Universität und die Wirtschaft in der Region des Erzgebirges gewonnen werden. Außerdem stellen die Projektergebnisse eine Grundlage für weitere Projekte im Gesamtvorhaben SRCC dar.

Da die Professur RTSD Projektergebnisse in einem angesehenen Journal publiziert hat, wird auch in Zukunft stets auf das Vorhaben verwiesen. Die damit verbundene Strahlkraft sorgt für internationale Aufmerksamkeit des Projektvorhabens in der WIRI-Region, welche durch Innovation gekennzeichnet ist. Somit wird sie auch für junge Menschen interessant und kann dem demografischen Wandel in der Region entgegenwirken. Außerdem flossen die Ergebnisse dieses Artikels in die Dissertation des Mitarbeiters Patrick Schmidt mit dem Titel „Stabilization of Nonlinear Systems under Measurement Errors using Smooth and Nonsmooth Control Lyapunov Functions“, welche bereits im Juni eingereicht wurde.

Die Professur SSE bindet die Erkenntnisse aus den Literaturrecherchen und den Ergebnissen der UWB-Untersuchungen in Lehrveranstaltungen ein. Außerdem wurde die UWB-Simulationssoftware in Zusammenarbeit mit einer studentischen Hilfskraft erstellt, welche seine Kenntnisse im Bereich App-Entwicklung einbringen und weiter ausbauen konnte. Auch eine Masterarbeit wurde in der Thematik des Projektes ELFE von der Professur SSE betreut. Der Student arbeitete sich in das Thema der hochgenauen Lokalisierung von Triebfahrzeugen und deren Notwendigkeit ein und hat direkt zur Verbesserung der UWB-Simulationsumgebung beigetragen. Außerdem wurde der Test der Software im realen Szenario durch den Studenten unterstützt und ausgewertet. Darüber hinaus bilden die Projektergebnisse eine wesentliche Grundlage für ein weiteres laufendes Promotionsvorhaben, dessen Abschluss für 2026 vorgesehen ist. Die im Projekt gewonnenen technischen und sicherheitsspezifischen Einsichten fließen in die wissenschaftliche Vertiefung des Themengebietes ein.

Auf Basis der aktuellen Resultate bereitet die Professur SSE und RTSD außerdem neue Projektskizzen für kommende Förderaufrufe (u. a. BMFTR, BMV) vor, insbesondere zu den Themen sichere UWB-Infrastrukturen, Hybrid-Lokalisierung und verlässliche Testumgebungen für bahnspezifische Anwendungen. Damit tragen die Projektergebnisse nicht nur zur akademischen Lehre und Nachwuchsförderung bei, sondern schaffen eine Grundlage für zukünftige Forschungsvorhaben und eine nachhaltige Weiterentwicklung der Technologie im Bahnumfeld.

Die Projektergebnisse wurden dem breiten Publikum im Rahmen von Veranstaltungen, wie dem Tag der offenen Tür und der Langen Nacht der Wissenschaften, präsentiert. Die vorgestellten Ergebnisse stießen auf Interesse seitens der Besucher, was sich langfristig auf die Gewinnung von Fachkräften auswirken kann.

Ein Artikel der Lokalpresse (Freie Presse) vom September 2024 berichtete über das Vorhaben des Projektes und unterstrich dessen Bedeutung für zukünftige Anwendungen der hochpräzisen Zugortung:



Abbildung 20: Presseartikel über ELFE Testfahrt

<https://www.freiepresse.de/chemnitz/autonomes-fahren-chemnitzer-testen-zentimetergenaue-navigation-mit-zug-artikel13533688>

5 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen

Die Professur RSTD veröffentlichte einen Artikel bei IEEE Access mit dem Titel „Some remarks on practical stabilization via CLF-based control under measurement noise“ (<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10811890>), welcher als Beispiel die im Rahmen der WiR Projekte entwickelte Zugdynamik betrachtet. Dabei geht es um das Halten einer Sollgeschwindigkeit im Beisein von Messungenauigkeiten. Zuletzt genannte tauchen in nahezu allen Anwendungen auf, in denen Sensoren zur Messung von Zuständen genutzt werden, wie auch im Projekt ELFE. Außerdem sind weitere Veröffentlichungen geplant, die auf den Projektergebnissen basieren.

Die Professur SSE veröffentlichte einen Artikel auf der IEEE System-On-Chip (SOCC) Konferenz 2024 in Dresden. Der Titel ist „Performance Investigation for IEEE 802.15.4z-compliant SiP-assisted Ranging“ und behandelt die Untersuchung verschiedener UWB-PHY Parameter auf die Reichweite und Zuverlässigkeit von UWB TWR (Two-Way-Ranging), also Abstandsmessungen mittel UWB-Funkkommunikation. Diese Abstandsmessungen stellen die Grundlage für die Innenraumlokalisierung mittels UWB dar. Die Veröffentlichung ist unter folgendem Link einsehbar: <https://doi.org/10.1109/SOCC62300.2024.10737815>. Außerdem wurde ein Paper auf dem Workshop on Long-Term Human Motion Prediction der IEEE International Conference on Robotics & Automation (ICRA) 2025 in Atlanta veröffentlicht. Die Veröffentlichung ist hier einsehbar: <https://arxiv.org/abs/2505.05851>. Dabei wurde mit Hilfe von einem Motion-Capture (MoCap) System das im Projekt genutzte UWB-Lokalisierungssystem in echten Szenarien aufgezeichnet und ein großer Datensatz, auch mit anderen Sensormodalitäten, aufgezeichnet. Dank der MoCap Daten liegt nun ein Datensatz mit hochgenauer UWB-Innenraumposition vor, welcher genutzt werden soll, um die UWB-Simulation aus AP 3 noch weiter zu verifizieren und zu verbessern. Die Veröffentlichung der Resultate dieser Untersuchungen ist geplant. Weitere auf den Projektergebnissen basierende Veröffentlichungen sind geplant.