

Sachbericht zum Verwendungsnachweis

Teil I – Kurzbericht

WIR!-Projekt: Train Integrity Monitoring System
(FKZ.: 03WIR1206A)

**Zuwendungs-
empfänger:** Technische Universität Chemnitz

Laufzeit: 02/2021 – 01/2024

1 Ursprüngliche Aufgabenstellung

Die Machbarkeit einer fahrzeugseitigen Zugintegritätsüberwachung sollte auf der Basis einer theoretischen Analyse und durch Erprobung mittels eines Demonstrators auf Fracht-Zustellfahrten im Raum Chemnitz-Erzgebirge untersucht werden. Die wesentlichen Projektziele waren die Entwicklung eines alltagsfähigen und bahntauglichen Verfahrens zur Überwachung der Zugintegrität mit Berücksichtigung der besonderen Verhältnisse im Eisenbahngüterverkehr sowie die praktische Erprobung eines Demonstrators auf Basis bereits untersuchter Methoden zur Überwachung der Zugintegrität. Als Ergebnisse liegen ein Demonstrator zum Nachweis der Machbarkeit der Feststellung und Überwachung der Zugintegrität im Güterverkehr vor ebenso wie Aufschlüsse über die Positionierung mittels GNSS im Bahnumfeld und Aufschlüsse über Funkwellenausbreitung bei Güterwagen. Ziel des Forschungsvorhabens war die praktische Erprobung einer oder mehrerer Lösungen zur Überwachung der Zugintegrität sowie die betriebliche Integration im SRCC.

2 Ablauf des Vorhabens

Um den Demonstrator für das Zugintegritätsüberwachungssystem (TIMS) spezifizieren zu können, wurden vorab umfangreiche Recherchen zu den Rahmenbedingungen und dem aktuellen Stand der Technik durchgeführt. Aufbauend darauf erfolgte die funktionale Beschreibung der (Teil-)Komponenten des TIMS und deren Zusammenwirken mit Definition der eisenbahnbetrieblichen Prozesse und Rahmenbedingungen sowie einer Gefährdungsanalyse. Zudem wurde eine Bewertungsmatrix für mögliche technologische Ansätze erarbeitet, um technische Realisierungsmöglichkeiten für die funktionalen Anforderungen strukturiert evaluieren zu können. Praktische Voruntersuchungen wurden in einem Bahnhof geleistet. Daran anschließend erfolgte ein Vergleich mit dem erstellten Berechnungsmodell in Matlab. Mit diesen Ergebnissen und den vorab getroffenen Anforderungen sowie dem Fachkonzept konnte durch die Zusammenarbeit aller Projektpartner ein TIMS-Lastenheft als Systemspezifikation erstellt werden. Im Wesentlichen enthielt das Lastenheft folgende technische Spezifikationen (Gesamtsystemübersicht Abbildung 1):

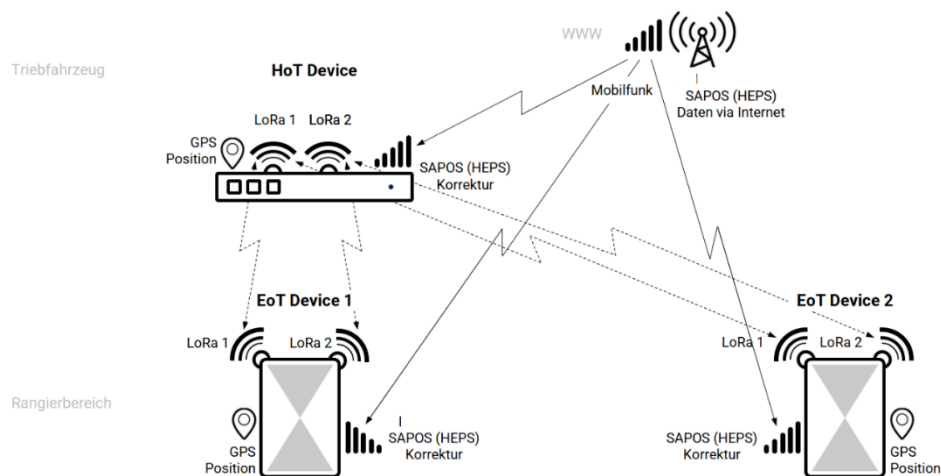


Abbildung 1: Gesamtsystem TIMS-Demonstrator

Daran anschließend wurde das weitere Vorgehen auf Grundlage der Recherchen, der Kompetenzen der Partner zu betrieblichen Abläufen bei der Bahn im Zusammenhang mit TIMS und den Möglichkeiten zu diesem Zeitpunkt besprochen und dokumentiert. Es konnte sich auf eine in Einzelschritten dem Versuchsvorlauf anpassende Vorgehensweise bei der Versuchsdurchführung geeinigt werden. Vor den Messungen in der Testumgebung wurden verschiedene einfache Tests durchgeführt, um den Demonstrator in mehreren Test-Iterationsstufen grundsätzlich funktionstauglich zu machen. Zur Digital Rail Convention Fachtagung mit ca. 300 z. T. internationalen Teilnehmern aus dem Eisenbahn-/Verkehrssektor wurde ein Workshop zum Thema TIMS durchgeführt und im Rahmen einer Demonstration weitere Tests bei Rangierfahrten im Bahnhof Schlettau durchgeführt. Diese dienten zugleich der öffentlichen Projektdemonstration vor einem Fachpublikum. Bei Fahrten wurde der Waggon von der Lokomotive getrennt. Somit konnte gezeigt werden, dass die gekoppelten EoT/HoT-Devices auf Lokomotive und Waggon durch ihre Kommunikation untereinander und die Messtechnik die Integrität dieses Zugverbands korrekt gegeben bzw. verloren melden. Es wurde daraufhin eine finale Testfahrt spezifiziert. Ziel war es hierbei, mit einem Schienenbus, an

dessen Spitze und Ende die EoT/HoT-Devices positioniert waren, die gesamte Teststrecke von Schwarzenberg nach Annaberg-Buchholz Süd abzufahren und Messdaten aufzunehmen. Die dabei generierten Daten für die ermittelte Zuglänge durch die verschiedenen Messsysteme, die Abweichung, die Satellitensicht, die Verbindungsqualität der Devices etc. wurden ausgewertet und flossen in die Ergebnisbeschreibung ein.

3 Zusammenfassung der wesentlichen Ergebnisse

In allen Arbeitspaketen konnten wichtige Erkenntnisse gesammelt werden, die für die Fortführung des Themas, aber auch für weiterführende Projekte genutzt werden können. Mit den im Projekt entstandenen Demonstratoren, als Basis für die experimentelle Arbeit, konnten eine Vielzahl von aufschlussreichen Daten gesammelt werden. Mit diesen erfolgte ein Nachweis, dass eine Feststellung der Integrität bei Güterzügen durch die verwendeten Technologien, als Alternative zur konventionellen Methode, möglich ist. Der Integritätsverlust durch mehrfach verursachte physische Zugtrennung und Simulation konnte jeweils sicher festgestellt werden. Die Geräte meldeten in der letzten Ausbaustufe den jeweiligen Zustand problemlos.

Die Positionierungsleistung der einzelnen devices ist sehr hoch. Dank der eingesetzten SAPOS unterstützten Satellitenortung konnte für den kompletten Messtag Ende 2023 z. B. für den HOT eine durchschnittliche Genauigkeit in der Ebene von 23 cm, bei überwaldeter und gleichzeitig stark beschneiter Strecke erreicht werden. Mit dieser präzisen Ortung ist es vorstellbar, eine gleisgenaue Ortung, beispielsweise in Güterbahnhöfen, zu gewährleisten. Auch die berechnete Zuglänge variiert somit kaum, was eine Folge der Verringerung der Zugfolgeabstände haben kann. In vielen weiteren untersuchten Szenarien konnte gezeigt werden, wie die Positioniergenauigkeit sich ohne die SAPOS-unterstützung oder bei Aufstellung der Geräte im Fahrzeuginnenraum verhielt. Es gab in der ganzen Messperiode keine outages.

Mit der LoRa-RSSI Technologie zum Messen der Distanz zwischen Sender und Empfänger über den Pfadverlust während der Nachrichtenübertragung, wurden mit und ohne Sichtverbindung zwischen den Geräten zahlreiche erfolgreiche Untersuchungen im Eisenbahnumfeld angestellt. Die gewonnenen Erkenntnisse in den Voruntersuchungen flossen in die Entwicklung des Demonstrators. Es konnten sowohl bei der Digital Rail Convention als auch den Messfahrten erfolgreich Verbindungen hergestellt werden. Die anfänglichen Probleme mit der großen Abweichung der Genauigkeit konnten durch die Verbesserung der Kalibrierung vor Messbeginn abgestellt werden. Es gelang bei der letzten Messfahrt eine durchschnittlich gemessene Länge von 11,5 m (kalibrierter Wert = 13m; Fahrzeuglänge = 13,55m) mit einer Standardabweichung von ca. 1 m über die gesamte Messdauer zu erzielen. Die Verbindungsrate lag bei 100%. Auch ein simulierter Verlust der Integrität hätte durch diese Messeinrichtung bei Verarbeitung erkannt werden können. Die live-Feststellung der Integrität erfolgte allerdings ausschließlich auf Basis der gewonnen GNSS-Daten.

Die Kommunikation über die Mobilfunkverbindung lief in den allermeisten Fällen problemlos. Dabei sei zu sagen, dass für alle Versuche und Messungen nur öffentliche Netze von Vodafone in der 4G Ausbaustufe genutzt wurden. Die 5G-Mobilfunkverbindung konnte aus zeitlichen Gründen bis zum Schluss nicht mehr implementiert werden, obwohl die Hardware und auch die SIM-Karten dazu kompatibel sind. Es gab zu dieser Thematik keine experimentellen Voruntersuchungen. In der Literaturrecherche, wurde jedoch schnell erkannt, dass für den Demonstrator aus Verfügbarkeitsgründen nur die Variante über öffentliche Netze entlang der Strecke Sinn ergibt. Bis zur Messfahrt im Dezember konnten keine Verbindungsabbrüche beim Betrieb des Demonstrators festgestellt werden. Obwohl auf der Strecke zwischen Schwarzenberg und Schlettau eine sehr hohe LTE und 5G Verfügbarkeit zum Messzeitpunkt bestand (Referenzmessungen) gab es an zwei markanten Stellen im Verlauf immer wieder Verbindungsabbrüche. Durch Analyse der Einzel-logfiles konnten an diesen Stellen hohe Störeinflüsse durch Rauschen und Interferenzen im Vodafone-Band festgestellt werden. Der Demonstrator hat zu dieser Zeit zuverlässig funktioniert, es konnten aber dennoch keine Daten zellulär zur Auswertung übertragen werden.

Die vorgesehene on-board Kommunikation durch eine LoRa P2P-Verbindung konnte leider nicht zuverlässig eingesetzt werden. Als stand-alone Verbindung waren bei Vorversuchen ohne Probleme Messstrecken von über 1km (Sichtverbindung) erreicht worden. Jedoch war nach vollständiger Implementierung keinerlei sinnvolle Übertragung möglich. In der Theorie liefert diese breit angewendete Technologie weite Übertragungsstrecken und hat für die angestrebte Aufgabe großes Potenzial. Für eine Bestätigung dieser These bedarf es weitere Forschung und experimentelle Untersuchungen.

Sachbericht zum Verwendungsnachweis

Teil II – Ausführlicher Bericht

WIR!-Projekt: Train Integrity Monitoring System
(FKZ.: 03WIR1206A)

**Zuwendungs-
empfänger:** Technische Universität Chemnitz

Laufzeit: 02/2021 – 01/2024

1 Arbeitspaketstruktur und Zeitplan

Das Projekt sollte ursprünglich im Juli 2020 beginnen und im März 2022 abgeschlossen werden. Offiziell begann es jedoch erst im April 2021 und war im Januar 2024 abgeschlossen. Durch die zweimalige, kostenneutrale Verlängerung der Projektlaufzeit konnten die letzten Messungen und Versuche unter Realbedingungen erfolgen. Zudem wurden die ausführliche, strukturierte Auswertung der Versuchsreihen und die Bewertung des TIMS-Systems im Verlängerungszeitraum ab Oktober 2023 durchgeführt. AP 3 bis AP 5 sind teilweise parallel bearbeitet worden. Somit konnten Zwischenergebnisse mit den einzelnen Modulen der Technologien erzeugt werden. Diese wiederum waren essenziell um den Demonstrator als Gesamtsystem zuverlässig und aussagekräftig für seine Aufgaben zu entwickeln. Durch diese Vorgehensweise konnten Lieferverzögerungen der Bauteile für den Projektfortschritt genutzt werden. Zudem lieferten die Zwischenergebnisse wesentliche Grundlagen für die beauftragte Softwareentwicklung.

Geplante Struktur der Arbeitspakete laut Antrag:

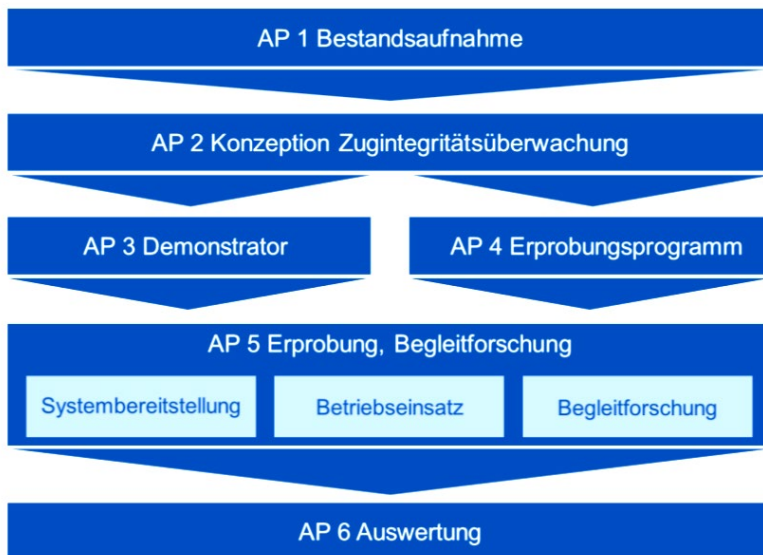


Abb. 1 Arbeitspaketstruktur laut Antrag

Durchgeführte Arbeiten anhand der Arbeitspakete und deren Zeiten:

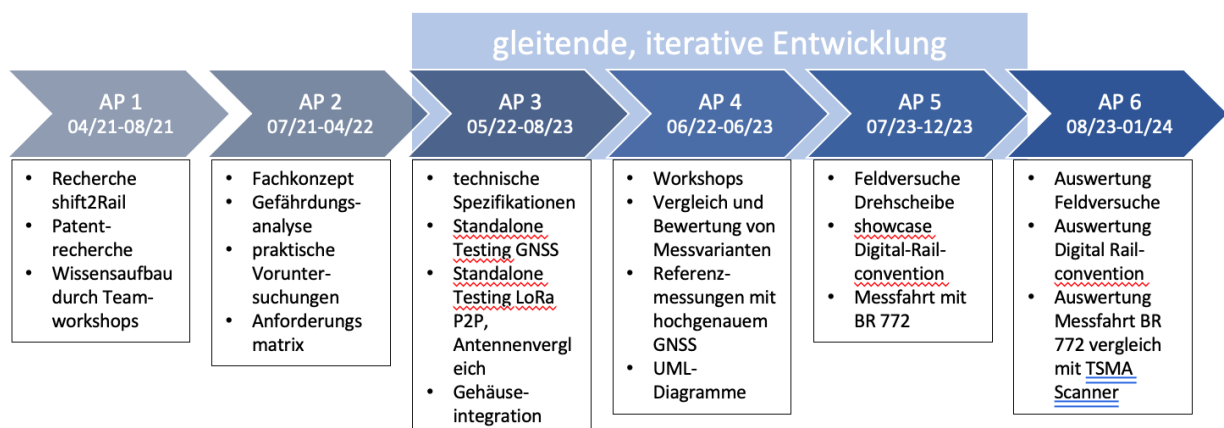


Abb. 2 zeitlicher Ablauf und durchgeführte Arbeiten

2 Durchgeführte Arbeiten

2.1 Arbeitspaket 1: Bestandsaufnahme

Um den Demonstrator für das Zugintegritätsüberwachungssystem (TIMS) spezifizieren zu können, wurden vorab umfangreiche Recherchen zu den Rahmenbedingungen und dem aktuellen Stand der Technik durchgeführt. Das dient dem Erlangen einer einheitlichen Wissensbasis für alle Projektbeteiligten und der Identifikation geeigneter technischer Lösungen. Folgende Untersuchungen wurden vorgenommen:

- Überblick über die bisherigen Forschungsergebnisse aus dem europäischen Forschungsprogramm Shift2Rail (Projekt-Bereich ETALON): Zusammenfassung und Inhaltsübersicht über die Shift2Rail-Dokumente („Deliverables“) in einer Datei
(https://projects.shift2rail.org/s2r_ip2_n.aspx?p=s2r_ETALON)
- Sammlung von Anforderungen an TIMS, die in Shift2Rail definiert wurden:
 - Anforderungen aus D2.1 – Functional Requirements Specification: Grundsätzliche Annahmen; High-level-funktionale Anforderungen; funktionale und Leistungsanforderungen; Charakteristik des Equipments; betriebliche Anforderungen
 - Anforderungen aus D2.2 – System Requirements Specification: Module von Sensorknoten; Umweltbedingungen; Abstandssensor; Antennen; SIL4-Prinzipien; Quality of Service für ggf. vorhandene streckenseitige Object Controller
 - Anforderungen aus D2.3 – Engineering Rules and Maintenance Requirements: RAM Parameter (MTTRS, MTBF, Lebensdauer etc.); Instandhaltungsanforderungen
 - Anforderungen aus D3.5 – Communication Systems and RF Components: RAMS-Parameter
 - Anforderungen aus D4.1 – Train Integrity Concept and Functional Requirement Specification: zu beachtende ETCS-Subsets; Zugintegritätskriterien; Netzwerk; Functional Hazard Analysis über FMECA-Ansatz (Failure Modes, Effects, Criticality Analysis); Anforderungen an die Funkkommunikation; Anforderungen an Energy Harvesting (basierend auf Erfahrungen des DEWI-Projektes)
 - Anforderungen aus D4.2 – Functional Architecture & Interface Specification
- Erarbeitung einer Übersicht über international verwendete EoT-Devices (EoT...End of Train; diese Devices dienen zur Überwachung des Zugendes):
 - Daiken EoT-Device (Brasilien):
 - überwacht Bremsleitung und Zugintegrität; Nutzung als Notbremse möglich
 - Das EoT kommuniziert über Zwei-Wege-UHF mit jeder Cabin Display Unit, die das AAR (American Association of Railroads) Protokoll verwendet.
 - Energieversorgung wird über Druckluft der Bremsleitung realisiert (mit Stützakku) -> Das ist innerhalb der EU laut TSI (Technische Spezifikationen zur Interoperabilität) nicht zulässig.
 - Bewegungssensor informiert, wenn letzter Wagen zum Stehen gekommen ist.
 - Hochleistungsantenne, stoßfest und mit spezieller Verkleidung
 - Sehr robustes Gehäuse mit Vibrationsschutz für Elektronik/pneumatisches System
 - TrainLink NG5 ATX EoT von der Firma Webtec (USA): Prinzip genauso wie Daiken
 - Niksar (Australien): Ebenso wie Daiken
 - Inteletrack Railway Technology End of Train Telemetry (Südafrika): analog zu Webtec und Daiken; zusätzlich: Remote head – Fernsteuerung/Überwachung über Zentrale, wenn Modul auf Lokomotive nicht erreichbar ist.
- Überblick über Patente im Zusammenhang mit Zugintegrität:
 - Train Control Network, Method for Communication and for Controlling Train Integrity (Thales)
 - Train Integrity Network System (TINS; Überwachung des Zustands von Drehgestellen)
 - Method and Computer Program Product for Monitoring Integrity of Railroad Train (General Electric)

- Vorrichtung zur externen/streckenseitigen Zuglängenmessung (Siemens)
- Analyse von Anforderungen an Zugintegritätsüberwachungssysteme (Train Integrity Monitoring Systems – TIMS) aus dem europäischen Zugbeeinflussungssystem ETCS heraus (Vorgaben der European Union Agency for Railways – ERA; Spezifikationen der Baseline 3, Release 2):
 - **Subset-026-1 („Introduction“):**
 - Einführung; Überblick über alle Kapitel/Anforderungen
 - **Subset-026-2 („Basic System Description“):**
 - Seite 8: grundsätzliche Architektur/Komponenten des Systems, Abbildung Schnittstellen; Verweise auf andere Subsets für jeweilige Schnittstellen zwischen Subsystemen
 - **Subset-026-3 („Principles“):**
 - Seite 17: Management of Radio Communication
 - Seite 26: Location Principles, Train Position and Train Orientation
 - Seite 87: Speed and Distances Monitoring
 - Seite 154: Special Functions; RBC/RBC Handover
 - Seite 164: Data Consistency
 - Seite 176: System Data (Fixed Values, National/Default Values, Train Data, Additional Data, Date and Time, Data View)
 - **Subset-026-4 („Modes and Transitions“)**
 - Definition der Betriebsarten: ISOLATION, NO POWER, SYSTEM FAILURE, SLEEPING, STAND BY, SHUNTING, FULL SUPERVISION, UNFITTED, STAFF RESPONSIBLE, ON SIGHT, TRIP, NON LEADING, REVERSING, LIMITED SUPERVISION, PASSIVE SHUNTING
 - Beschreibung der Übergänge zwischen diesen Betriebsarten
 - **Subset-026-5 („Procedures“):**
 - Enthält sämtliche Handlungsabläufe; Anforderungen an die Start-Prozedur des Systems, Flowchart zum Ablauf (S.10f.)
 - Beendung einer Mission (S. 22); Rangieren; On-Sight; Level Übergänge; Train Trip; Änderung der Orientierung des Zugs; Zugumkehr; Joining/Splitting; RBC Handover; Limited Supervision uvm.
 - **Subset-026-6 („Management of older System Versions“)**
 - **Subset-026-7 („ERTMS/ETCS language“):**
 - Komponenten der ERTMS/ETCS-Sprache – Variablen- und Paketdefinition
 - Pakete: Liste der Pakete; Pakete Strecke zu Zug; Pakete Zug zu Strecke
 - Definition der Variablen
 - Relevante Pakete/Variablen für TIMS
 - **Subset-026-8 („Messages“):**
 - Regeln für Eurobalisen-Telegramme, Euroloop-Nachrichten und Euroradio-Nachrichten (Nachrichten enthalten Pakete/Variablen)
 - Liste und Definitionen von Radio-Nachrichten Zug-Strecke und Strecke-Zug; relevant hierbei z. B.: Message 136 – „Train Position Report“ (S. 20)
 - **Subset-026-9 („Classification of Clauses“):**
 - Übersicht/Klassifizierung, welche Kapitel aus dem Subset-026 zu strecken-/fahrzeugseitigen Anforderungen, zu Definitionen, informativen Angaben etc. gehören
 - **Subset-034 – Train Interface FIS (Functional Interface Specification):**
 - Grundsätzlich: Spezifikation des funktionalen Interfaces zwischen ERTMS/ETCS-On-Board-Equipment und dem Fahrzeug, auf dem es installiert ist.
 - Mode Control: Sleeping; Passive Shunting; Non-Leading; Isolation
 - Steuerung/Kontrolle der Bremsen
 - Steuerung/Kontrolle der Zugfunktionen
 - Zugstatus: Cab Status; Direction Controller; Zugintegrität (-> „to be harmonized“,

keine konkrete Angabe); das bedeutet: Die Schnittstelle vom TIMS zum ETCS-Fahrzeugrechner EVC (European Vital Computer) ist noch nicht spezifiziert!

- Durchführung von Workshops zu speziellen Themen des ETCS für die Projektpartner
- Recherche in OCORA-Dokumenten (Spezifikationen für ETCS-Fahrzeugausstattung und -Schnittstellen): auch hier findet sich noch keine Definition der Schnittstelle zwischen TIMS und EVC.
- Anforderungen der Deutschen Bahn: Kontaktaufnahme zu Kollegen der Abteilung „Digitalen Schiene Deutschland“ und Austausch zu diesen Anforderungen (z. B. Zeitverhalten für Datenaustausch) sowie möglichen Fehlerquellen; Risikoanalyse „Sichere Zuglänge“ mit SIL-Einstufung für verschiedene relevante Betriebsfunktionen in diesem Zusammenhang

Die ermittelten Systemlösungen und Technologien wurden kategorisiert und hinsichtlich folgender Hauptkriterien ausgewertet:

- Reifegrad (Technology Readiness Level – TRL)
- Latenz
- Safety Integrity Level
- Reichweite
- Anwendungsfälle
- Energiebedarf

2.2 Arbeitspaket 2: Konzeption Zugintegritätsüberwachung

Im Rahmen des 2. Arbeitspakets wurde auf Basis der Ergebnisse des 1. Arbeitspakets ein Fachkonzept, vorwiegend seitens des Projektpartners SRCC erarbeitet, welches den TIMS-Demonstrator, seine Teilkomponenten und deren Zusammenwirken zunächst funktional beschreibt. Anschließend wurden die betrieblichen Abläufe und Prozesse definiert sowie eine Gefährdungsanalyse durchgeführt. Zur Bewertung der technologischen Ansätze wurde zudem eine Matrix zur Auswahl der Vorzugslösung erarbeitet. Parallel zu diesen theoretischen Arbeiten liefen eine Vielzahl praktischer Voruntersuchungen von den beiden beteiligten Professuren Mess- und Sensortechnik und Nachrichtentechnik um die recherchierten, potenziellen Lösungen auf Praxistauglichkeit einzuschätzen.

2.2.1 Erstellung einer Bewertungsmatrix

Für das Längenermittlungssystem wurden in der Fachkonzept-Phase bereits einige technische Realisierungsvarianten vorgeschlagen. Um auf strukturierte Weise herauszufinden, welche Variante am geeignetsten ist, wurde eine Bewertungsmatrix erstellt. Diese ermittelt anhand vieler Kriterien mit Gewichtungsfaktoren und Punktwerte der Einzelbewertungen dieser Kriterien, welche Realisierungsvariante insgesamt am besten geeignet ist. Die Gewichtungsfaktoren ergeben sich aus dem Vergleich der Relevanz jedes Kriteriums mit allen anderen Kriterien. Folgende Kriterien wurden berücksichtigt, die sich in die Kategorien

- Leistungsfähigkeit (mögliche Datenrate, Zeitbedarf für Längenermittlung durch Sensoren, Latenz des Signalübertragungssystems, Latenz der gesamten TIMS-Variante, Genauigkeit der Messgröße, Übertragbarkeit der Messgröße in den Parameter "Länge"),
- Umsetzbarkeit (Ausrüstungsaufwand je Fahrzeug/Flotte, Kosten für die Ausrüstung mit der TIMS-Variante pro Fahrzeug/Flotte, Integrationsfähigkeit, Migrationsfähigkeit),
- betriebliche Praktikabilität (Bedienaufwand, Bedienfreundlichkeit, Energiemanagement), sowie
- RAMS (Zuverlässigkeit des Systems, Verfügbarkeit des Systems, Instandhaltbarkeit des Systems, Safety, Security)

einordnen.

Das Fachkonzept wurde in zwei Versionen ausgearbeitet: zusätzlich zur Beschreibung des im Projekt realisierten Demonstrators auch für eine mögliche allgemeine, netzweite Lösung als TIMS-Zielsystem. Der wesentliche Unterschied besteht im Einsatz von TIMS als autarkes System ohne Sicherheitsverantwortung im Demonstrator, während TIMS in der Vollversion über Schnittstellen mit dem ETCS-Fahrzeuggerät (EVC) verbunden ist und sicherheitsrelevante Informationen ausgetauscht werden.

2.2.2 Technologische Voruntersuchungen

Die Projektpartner der TU Chemnitz haben bereits in der Konzeptphase erste theoretische Analysen und einfach aufgebaute Messungen mit verschiedenen Technologieträgern durchgeführt, um deren grundsätzliche Eignung zur Verwendung im Demonstrator zu eruieren. Daraus wurden Anforderungen an das Kommunikations- und Sensorsystem konkretisiert.

Längenmessung über Empfangsfeldstärke mittels LoRa:

Die Entwicklungen im Bereich der Kommunikationstechnologien und der Erfassungsmöglichkeiten führen zu einem weit verbreiteten Einsatz von drahtlosen Sensornetzwerken (WSN) im Rahmen von IOT-Anwendungen. Zur Abschätzung der Entfernung zwischen Sensorknoten können verschiedene Techniken eingesetzt werden, darunter Eintrittswinkel (Angle of Arrival, AoA), Laufzeitmessungen (Time of Arrival, ToA) und Empfangsfeldstärke (Received Signal Strength Indicator, RSSI) des Funksignals.

Das RSSI-Verfahren misst die Stärke des von einem Sensorknoten empfangenen Signals, bestimmt den Signalverlust während der Übertragung und wandelt ihn dann mithilfe eines theoretischen oder empirischen Modells in eine Entfernung um. Die meisten drahtlosen Transceiver liefern RSSI-Informationen, ohne dass zusätzliche kostspielige Hardware integriert werden muss. Diese Methode wird in diesem Projekt verwendet, weil sie unter anderem eine kostengünstige Lösung darstellt.

Das von der LoRa Alliance definierte LoRaWAN nutzt die physikalische Schicht mit großer Reichweite (LoRa), um drahtlose Kommunikation über große Entfernungen mit niedrigen Datenraten und minimalem Stromverbrauch zu ermöglichen. LoRa wurde für Entfernungsmessung und Positionierung untersucht. LoRaWAN ermöglicht die Verwendung von RSSI zur Lokalisierung, wird aber in diesem Projekt nicht weiter untersucht.

In diesem Projekt wurde LoRa für die Implementierung der RSSI-Technik ausgewählt, um die Entfernung zwischen dem HoT-Knoten und den beiden EoT-Knoten mit möglichst geringen Abweichungen zu schätzen. Das RSSI-Signal wird zwischen Sender- (2 Stck. EOT) und Empfängerknoten (HOT) ausgetauscht, wobei die RSSI-Werte auf der Empfängerseite geloggt werden. Beide Knoten sind mit einem LoRa-Modul ausgestattet. Der Prozess der LoRa-basierten RSSI-Entfernungsschätzung wird im Folgenden beschrieben:

Prinzip der Messung:

Entfernungsmessung mit eingebautem RSSI auf LoRa-Knoten:

- Der HOT-Knoten sendet eine Suchanfrage mit der ID des Zuges
- Die EOT-Knoten senden Signale an den HOT-Knoten
- Der HOT-Knoten misst seine Entfernung (d) zum EOT auf der Grundlage des empfangenen RSSI.

$$d = d_0 \times 10^{\left(\frac{RSSI_0 - RSSI}{10 \times \eta}\right)}$$

d_0 : Anfangsabstand zwischen HOT und EOT. Im Allgemeinen $d_0 = 1$ m

RSSI: Path loss (Pfadverlust, dBm)

$RSSI_0$: Path loss bei Anfangsabstand d_0 (dBm)

η : Path loss Exponent (Konstante)

Um die am Empfangsknoten empfangene Leistung zu messen, hängt RSSI jedoch von der Ausbreitungs-umgebung ab. Diese Methode kann in manchen Situationen unzuverlässig und inkonsistent sein, insbesondere wenn Hindernisse vorhanden sind. Um der Signalabschwächung entgegenzuwirken, ist eine präzise und angemessene Signalverarbeitung oder Filterung der erfassten Rohdaten erforderlich. Aus diesem Grund wird der Kalman-Filter auf die erfassten Rohdaten angewendet.

Kalman-Filter Prozess:

Mit dem Kalman-Filter können unbeobachtete Variablen aus verrauschten Messungen geschätzt werden. Er berücksichtigt die gesamte Historie der früheren Messungen. Der Kalman-Filter besteht aus zwei grundlegenden Stufen: Vorhersage (Prediction stage) und Aktualisierung (Update stage). In der Vorhersagephase wird ein Vorhersagemodell anhand der zuvor gesammelten Daten formuliert. In der Aktualisierungsphase werden die neuesten Beobachtungen verwendet, um den Filterprozess zu verfeinern. Die unten aufgeführten Formeln definieren den Kalman-Filter.

$$\text{Prediction stage : } \bar{x} = x \quad \rho = \rho + Q$$

$$\text{Update stage : } k = \frac{p}{\rho + R}$$

$$x = \bar{x} + k(RSSI - \bar{x})$$

$$p = p(1 - k)$$

x , p , Q und R stehen für den gefilterten RSSI-Wert, den geschätzten Fehler, das Prozessrauschen, das Messrauschen bzw. die Verstärkung. RSSI bezieht sich auf die Rohdaten des gemessenen RSSI. In der Untersuchung wird der Wert „ R “ durch Analyse der Standardabweichung einer Stichprobe von RSSI-Werten bestimmt. „ Q “ wird auf die Hälfte des Wertes von „ R “ festgelegt, um die Zeitverzögerung zu verringern. Sowohl „ R “ als auch „ Q “ werden während einer Offline-Testphase abgeleitet. Die Auswahl geeigneter R - und Q -Werte zielt darauf ab, den Schätzfehler „ p “ zu minimieren. Für die effektive Implementierung des Kalman-Filters ist ein Verständnis der Prozesse innerhalb des beobachteten Systems notwendig.

Experimentelle Untersuchungen im Eisenbahnmuseum Schwarzenberg:

Zur Messung der Zuglänge werden zwei Knotenpunkte installiert. Ein Knoten, das EOT-Gerät (End-of-Train), befindet sich am letzten Wagen. Der zweite Knoten, das HOT-Gerät (Head-of-Train) befindet sich an der Lokomotive. Das Prinzip des Messaufbaus ist in Abb. 3 dargestellt.

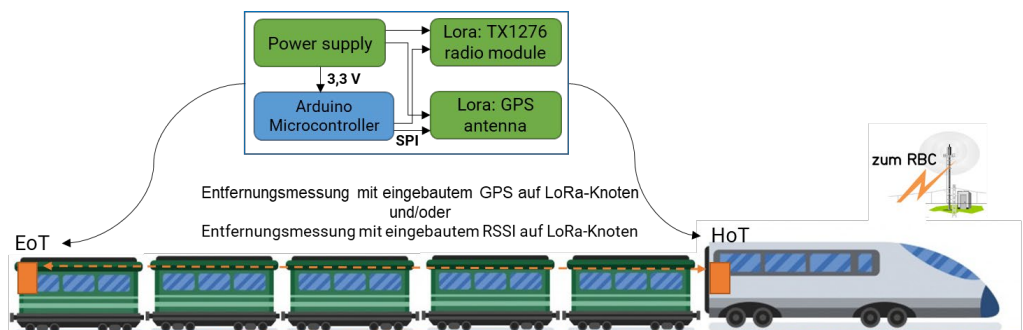


Abb. 3 Abstandsmesssystem Übersicht

Die folgenden Parameter wurden für alle Messungen verwendet.

- Spreading Factor (SF): 7
- Sendeleistung: 6 dbm (5 bis 23 dbm)
- Frequenz: 868 MHz
- Bandbreite: 125 kHz
- $RSSI_0$: -38 dBm (LoRa-RSSI)
- η : 3,4 (LoRa-RSSI)



Abb. 4 Vor-Ort-Messung Schwarzenberg

Der Spreizfaktor (SF) ist dabei die Geschwindigkeit, mit der sich die Signalfrequenz über die Bandbreite eines Kanals ändert. Der Spreizfaktor und die Datenrate stehen in einem offensichtlichen Zusammenhang: je höher der Spreizfaktor, desto niedriger die Datenrate. Wenn die Übertragungsdauer länger ist, ist das Signal leichter zu empfangen und vom Rauschen zu unterscheiden. Andererseits bedeutet das langsame Senden von Daten, einen höheren Stromverbrauch.

Entfernungsmessung mit eingebautem RSSI auf LoRa-Knoten

a. Abstandseffekte bei den Messfehlern, Zielsetzung:

Der Grund für dieses Experiment ist, den Fehler der Entfernungsmessung in Abhängigkeit der Zuglänge zu bestimmen, wenn die Länge des Zuges verändert wird (Waggon hinzufügen oder entfernen).

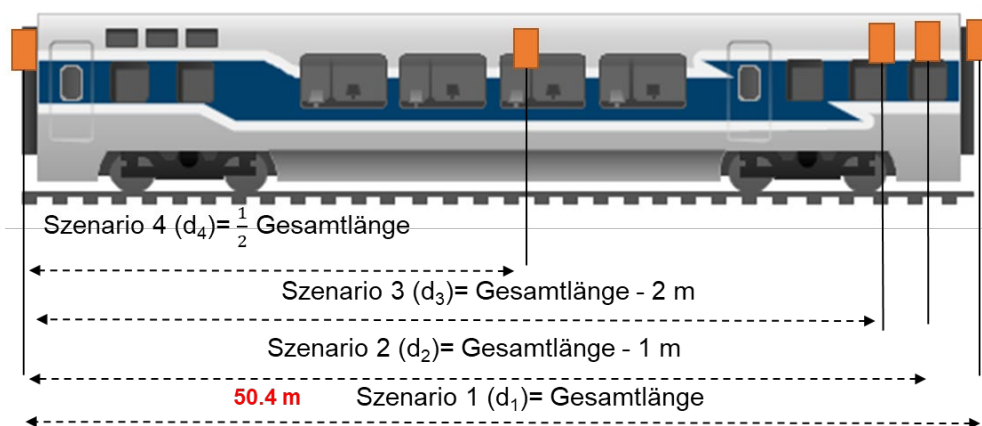


Abb. 5 Beschreibung der verschiedenen Szenarien

Bei der ersten Messung werden die zwei LoRa-Knoten mit nur einem Funkgerät, SX1276 Transceiver, verbunden. Die Gesamtlänge des Zuges beträgt 58,4 Meter. Das LoRa-Funkmodul ist auf SF= 7 eingestellt. In vier Szenarien wurde der Abstand zwischen Sender und Empfänger bis Gesamtlänge des Zuges geändert. Beide Knoten werden in allen Messungen in einem Abstand von 2,5 Metern zum Boden angebracht. Für jedes Szenario werden 100 Messungen durchgeführt. Die durchschnittliche Entfernung von 100 Messungen wird zur Berechnung der Zuglänge verwendet.

Ergebnisse

	mittlere, gemessene Entfernung (m)	Fehler (%)
$d_1 = 50,4 \text{ m}$	50,62	0,43
$d_2 = 49,4 \text{ m}$	49,72	0,64
$d_3 = 48,4 \text{ m}$	48,5	0,21
$d_4 = 25,2 \text{ m}$	25,46	0,5

Tabelle 1 Fehler bei der Entfernungsmessung für 4 Szenarien

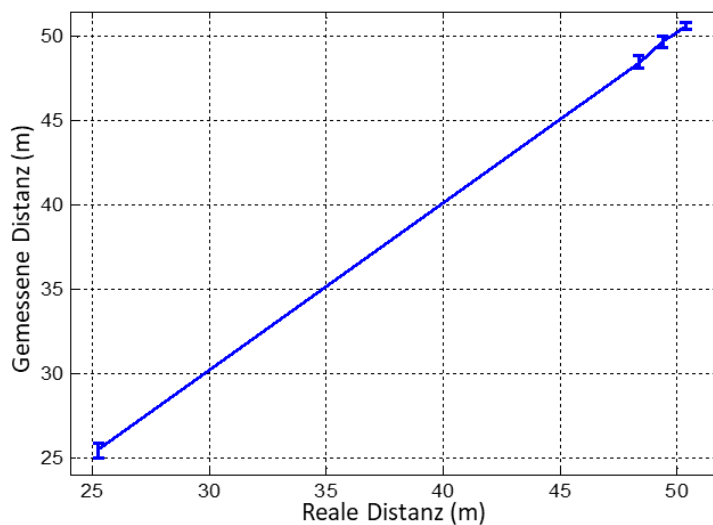


Abb. 6 Standardabweichung der gemessenen gegenüber tatsächlicher Entfernung

b. Optimale Platzierung von Knotenpunkten, Zielsetzung:

Der Grund für diese Messung ist die Überprüfung der optimalen Positionen (y-Achse) der EOT- und HOT-Knoten.

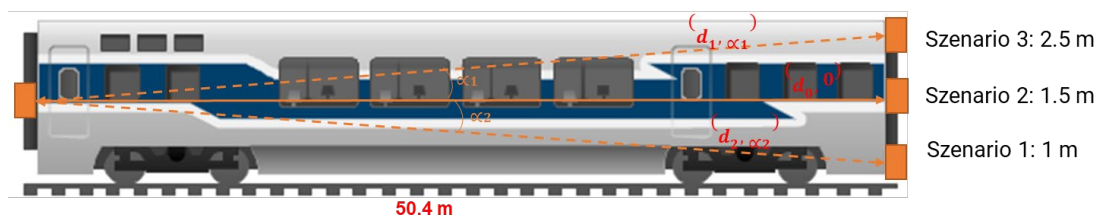


Abb. 7 Beschreibung der verschiedenen Szenarien

Bei diesen Messungen werden die zwei LoRa-Knoten mit nur einem Funkgerät, SX1276 Transceiver, verbunden. Die Gesamtlänge des Zuges beträgt 58,4 Meter. Das LoRa-Funkmodul ist auf SF= 7 eingestellt. Der EOT-Knoten befindet sich am Ende des Zuges. HOT befindet sich an der Spitze des Zuges. Die y-Achse wird durch die Verwendung verschiedener Winkel verändert. Für jedes Szenario werden 100 Messungen durchgeführt. Die durchschnittliche Entfernung von 100 Messungen wird zur Berechnung der Zuglänge verwendet.

Ergebnisse

	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
Fehler(%)	4.12	2.5	0.47

Tabelle 2 Fehler bei der Entfernungsmessung für 3 Szenarien

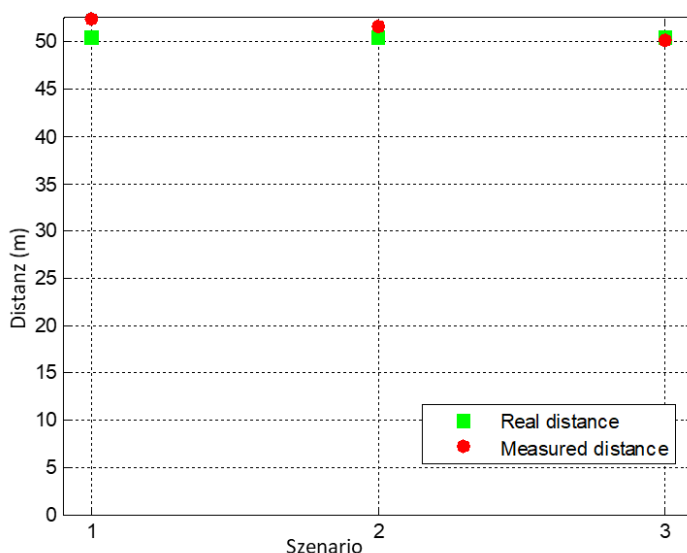


Abb. 8 Vergleich gemessene und tatsächliche Entfernung bei Änderung der Höhe

In Tabelle 3 ist die durchschnittliche Stromaufnahme für die Übertragung eines Pakets vom EOT zum HOT angegeben. Es fließen 100 mA bei einer Laufzeit von 29ms bei der Übertragung eines RSSI-Wertes.

Beschreibung	Laufzeit (ms)	Current Consumption (mA)
Wake up	15.8	88.34
Radiopreparation	2	71.27
Delay	150	77.13
Übertragung	29.9	100

Tabelle 3 Stromverbrauch zur Übertragung eines RSSI-Wertes

c. Entfernungsmessung mit eingebautem GPS auf LoRa-Knoten, Zielsetzung:

Der Grund für diese Messung ist die Überprüfung der optimalen Positionen (y-Achse) der EOT- und HOT-Knoten.

Hardware – Spezifikationen

Die EOT-Knoten ist mit einem LoRa/GPS-Shuttle ausgestattet. Dragino, LoRa/GPS Shield ist eine Erweiterungsplatine für LoRa/GPS zur Verwendung mit dem Arduino. Das GPS-Modul, L80 GPS (basierend auf MTK MT3339), wurde für Anwendungen entwickelt, die ein über die seriellen Schnittstellen mit dem Arduino verbundenes GPS verwenden, wie z. B. Zeitmessungsanwendungen oder allgemeine Anwendungen, welche GPS-Informationen benötigen. Das GPS unterstützt auch die automatische Antennenumschaltung. Es kann zwischen der internen Patch-Antenne und der externen aktiven Antenne umschalten und behält die Positionierung während des Umschaltvorgangs bei.

Der HOT-Knoten ist mit einem LoRa-GPS Raspberry Pi Shield ausgestattet. Es überträgt die berechnete Entfernung an den EVC. Außerdem verfügt sie über das Funkgerät SX1276 zum Empfang von Daten des EOT-Knotens und das GPS-Modul L80 zur Standortbestimmung.

Die einkanalige LoRaWAN-Gateway-Bibliothek wird in LoRa/GPS_HAT-Gateways verwendet. Sie kann nur einen Kanal unterstützen. Ein zusätzlicher Raspberry Pi wird zur Datenverarbeitung verwendet.

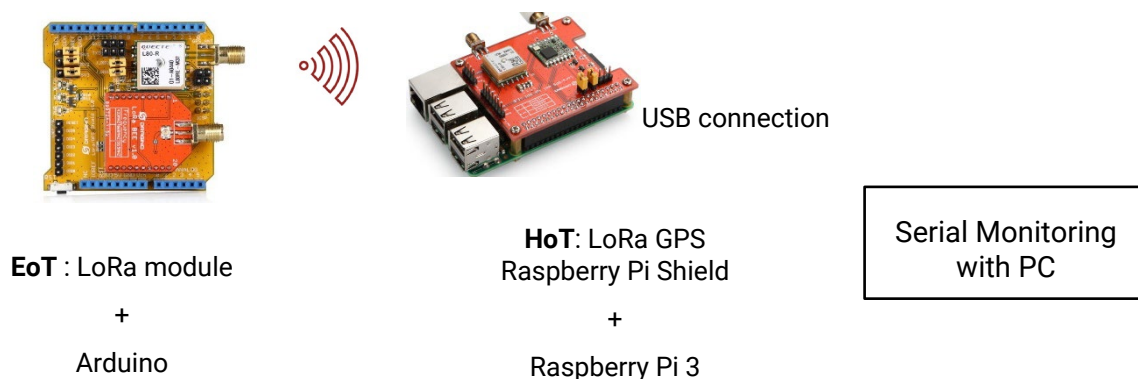


Abb. 9 Kommunikation mit dem LoRa/GPS-Shield

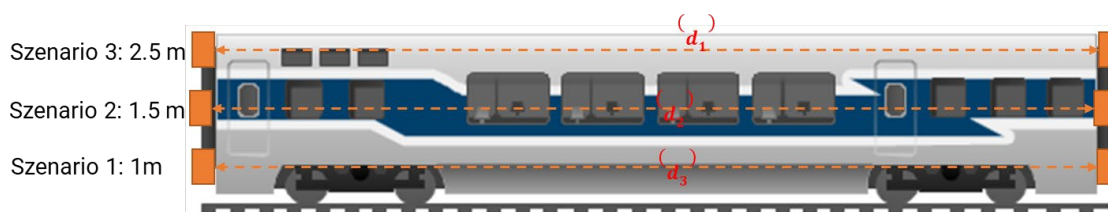


Abb. 10 Entfernungsmessung mit LoRa-GPS

In diesem Versuch sind zwei LoRa-Knoten mit LoRa/GPS Shield ausgestattet. Die Gesamtlänge des Zuges beträgt 58,4 Meter. Das LoRa-Funkmodul ist auf SF= 7 eingestellt. Die Höhe der Geräte wird wie in Abb. 10 zu sehen, mit drei verschiedenen Werten variiert. Für jedes Szenario werden 100 Messungen durchgeführt. Der durchschnittliche Abstand von 100 Messungen wird zur Berechnung der Zuglänge verwendet. Abb. 9 Kommunikation mit dem LoRa/GPS-Shield

Ergebnisse

	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
LAT1	50,545528	50,545528	50,545528
LAT2	50,545703	50,54568	50,545715
LON1	12,777889	12,777889	12,777889
LON2	12,778513	12,778568	12,77854
Messwert (m)	48,19	50,86	50,48
Error (%)	4,36	0,9	0,15

Tabelle 4 Fehler bei der Entfernungsmessung für 3 Szenarien

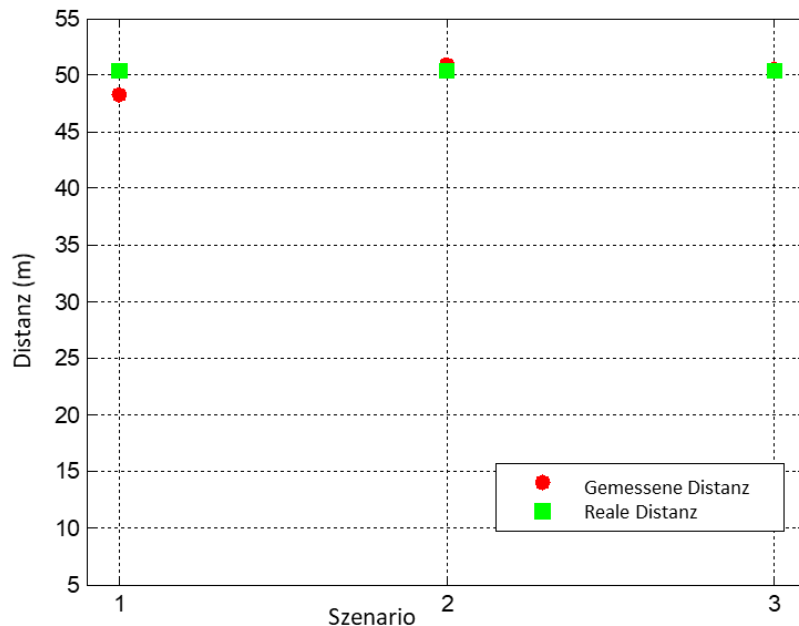


Abb. 11 Vergleich zwischen der gemessenen und tatsächlichen Entfernung mittels LoRa-GPS

Fazit:

Die Entfernungsmessung konnte erfolgreich erprobt werden. Mit Hilfe der Kalibrierung konnten die Parameter zur Berechnung der Distanz erfasst und analysiert werden. Die Genauigkeit der Messung bewegt sich dabei in einem akzeptablen Bereich und würde eine Erkennung der Zugintegrität und der Zuglängen ermöglichen. Einflussfaktoren auf die Messung ergeben sich durch die Beschaffenheit des Zuges und der Strecke bzw. Störungen entlang dieser. Inwiefern die sich daraus ergebenden Beeinträchtigungen relevant sind, muss unter realen Anwendungsbedingungen getestet werden. Eine signalstärkebasierte Erfassung der Integrität stellt eine kostengünstige und erweiterbare Lösung dar, die sich im Feldtest als zuverlässig gezeigt hat.

Analyse der drahtlosen Übertragung für die Kommunikation zwischen Zugschluss und Zugspitze

Theoretische Analyse

Wir betrachten ein Szenario, in dem ein Zugschlussgerät (EOT), das im letzten Wagen installiert ist, mit einem Zuganfangsgerät (HOT) kommuniziert, das sich in der Lokomotive befindet. Ein Beispielsetup wird in Abb. 12 gezeigt. In diesem Szenario besteht keine Sichtverbindung zwischen dem Transmitter (TX, Sender) und Receiver (RX, Empfänger). Eine Signalabschwächung aufgrund dieser Blockade ist unvermeidbar. Die Leistung der drahtlosen Signalübertragung unterliegt hauptsächlich den folgenden zwei großen Dämpfungsanteilen:

- Freiraumdämpfung "Free-space path-loss (FSPL)", im Beispiel hat das Triebfahrzeug einen Abstand zwischen 700m – 1500m zum letzten Wagen
- Das Blockieren der Sichtverbindung und Abschattungseffekte welche durch die an das Triebfahrzeug angehängten Wagen verursacht werden

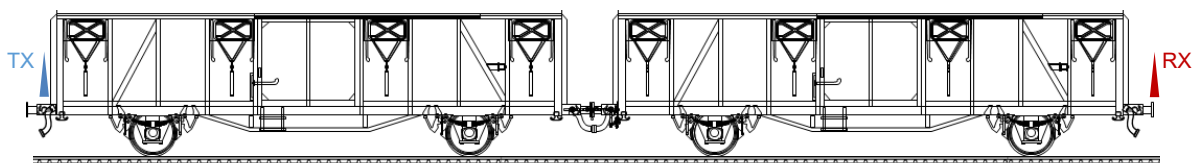


Abb. 12: Beispielsetup

In diesem Fall wird unter Berücksichtigung der Signalübertragungsleistung im Fernfeld der Sendeantenne in Richtung der Empfangsantenne und unter Vernachlässigung der Mehrwegeausbreitung das Pfadverlustmodell definiert als

$$L \text{ (dB)} = L_{\text{FSPL}} + L_{\text{Shadow}} \quad (1)$$

Die Freiraumdämpfung ist abhängig von der Frequenz des Trägersignals und dem Abstand zwischen Sender und Empfänger der drahtlosen Kommunikation.

Das diskutierte Modell für den Pfadverlust (FSPL) im freien Raum wird für die Trägerfrequenzen 169 MHz, 868 MHz, 2,45 GHz und 5,8 GHz bewertet. Die beiden höheren Frequenzen gehören zu den ISM-Bändern (Industrial-Scientific-Medical), in denen die Übertragung mit 10 W Strahlungsleistung (ERP, „effective radiated power“) lizenzfrei ist. Die beiden niedrigeren Frequenzen gehören zum drahtlosen LoRa-Standard (LongRange) wo die Signalübertragung bis zu 10mW (169 MHz) und 25mW (868 MHz) Strahlungsleistung keine Lizenz erfordert.

Die numerischen Auswertungen der FSPL sind in Abb. 13 dargestellt. Im Falle der Nahbereichskommunikation, bei der die Transceiver (oder Repeater) in einer maximalen Entfernung von zwei Wagen, z. B. 30 m, installiert sind, kann man feststellen, dass die Dämpfung von etwa 48 dB bei 169 MHz bis zu ca. 77 dB bei 5,8 GHz Trägerfrequenz reicht.

Dieses Ergebnis impliziert, dass im Falle einer Line-of-Sight-Kommunikation, d. h. ohne Blockierung der Sichtverbindung durch die Waggonen, bei einer Sendeleistung von 20 dBm die Empfängerempfindlichkeit - einschließlich des Antennengewinns - unter -28 bzw. -57 dBm liegen muss. Im Falle einer Langstreckenkommunikation, bei der kein Signalverstärker vorhanden ist und der EOT direkt mit dem HOT kommuniziert, zeigt das FSPL-Modell eine Dämpfung von 82 dB (169 MHz) und 111 dB (5,8 GHz) bei einer Entfernung von 1500 m. Diese FSPL-Ergebnisse zeigen, dass für eine direkte EOT-HOT-Kommunikation die Empfängerempfindlichkeiten - einschließlich des Antennengewinns - unter -62 dBm bzw. -91 dBm liegen müssen. Dennoch müssen weitere Dämpfungen durch die Abschattung des Fahrzeugverbandes beim jeweiligen Setup berücksichtigt werden.

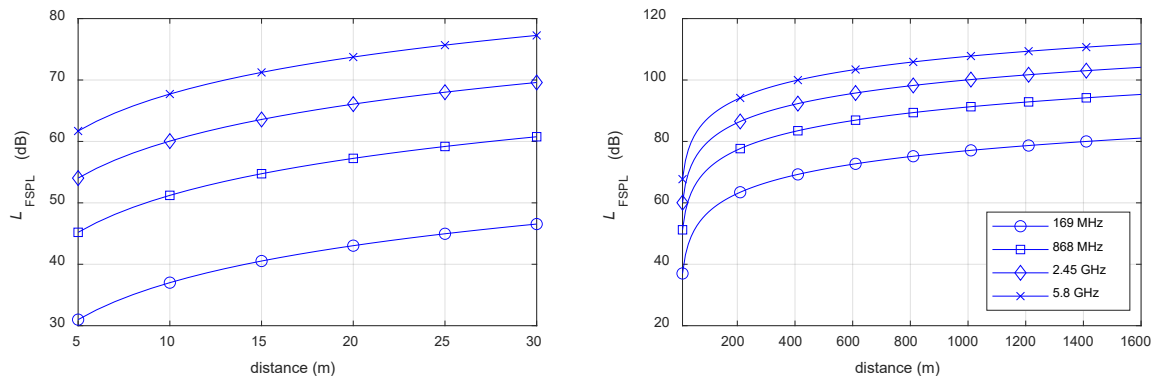


Abb. 13: Signalabschwächung für kurze (links) und weite Entfernungen (rechts)

Im folgenden Abschnitt wird die Signalausbreitung inkl. einer Blockade der Sichtverbindung mittels zweistufiger Beugung an den Waggonkanten (knife-edge) simuliert. Unter der Annahme, dass die Waggonen zwischen den Sendegeräten perfekte Leiter sind, wurde auch die Reflexion am Boden zwischen den beiden Waggonkanten in der Simulation berücksichtigt. Dabei wird angenommen, dass die Sendeantenne am Standort 0 m und in einer Höhe von 2,5 m mit einer Hauptstrahlbreite von 110°, horizontaler Polarisation und einem Elevationswinkel $\theta = 0$ platziert ist. Die erste „Kante“ befindet sich in zwei Abständen von 0,5 m und 2,5 m von der Sendeantenne mit einer Höhe von 3,7 m. Die Position der zweiten Messerkante mit der gleichen Höhe von 3,7 m ist variabel.

Das Signal unterliegt bei Entfernungen von >15m und >80m nach der zweiten „knife-edge“ einer Dämpfung von ca. 30dB - 35dB in den Frequenzbereichen 5,8 GHz und 2,4 GHz, wenn sich ein Transceiver oder auch ein Signalverstärker, in der Nähe befindet. Wir stellen außerdem fest, dass bei der Platzierung des zweiten „knife-edge“ in 80 m Entfernung die Entfernungen unter 80,5 m das Signal mit mehr als 40 dB Dämpfung empfangen wird. Die Abbildungen 7-10 zeigen die Simulationsergebnisse für die Langstreckenkommunikation bei den beiden niedrigeren Frequenzen von 868 MHz und 169 MHz. Hier ist zu beobachten, dass aufgrund der großen Wellenlänge der beiden Trägerfrequenzen 868 MHz und 169 MHz das Empfangssignal stark gedämpft wird und unter -40 bzw. -60 dB liegt, wenn sich die erste „knife-edge“ in 0,5 m Entfernung von der Sendeantenne befindet. Befindet sich die erste „knife-edge“ dagegen in 2,5 m Entfernung, so verbessert sich die Signalstärke um 10 dB bei der Frequenz 868 MHz und um nahezu 20 dB bei 169 MHz.

Auf der Grundlage der obigen FSPL- und Beugungsanalyse berechnen wir die Gesamtdämpfung und fassen sie in Tabelle 5 zusammen. Dabei berücksichtigen wir eine maximale Sendeleistung von 10 dBm für die Frequenz 169 MHz, 14 dBm für 868 MHz und 40 dBm für die Frequenzen 2,4 und 5,8 GHz.

	Erster knife-edge		Zweiter knife-edge				Verlustleistung (dB)	Erforderliche Empfängerempfindlichkeit ohne Antenne (dBm)	Eingangsgleistung (dBm)
	0.5m	2.5m	15m	80m	800m	1500m			
169 MHz	X				X	X	142.5	-132.5	10
		X			X	X	120.5	-110.5	
868 MHz	X				X	X	131	-117	14
		X			X	X	121	-107	
2450 MHz	X		X				93.6	-53.6	40
	X			X			108.1	-68.1	
5800 MHz	X		X				101.2	-61.2	40
	X			X			115.8	-75.8	

Tabelle 5: Ergebnisse der Simulation für das Pfadverlustmodell L (dB).

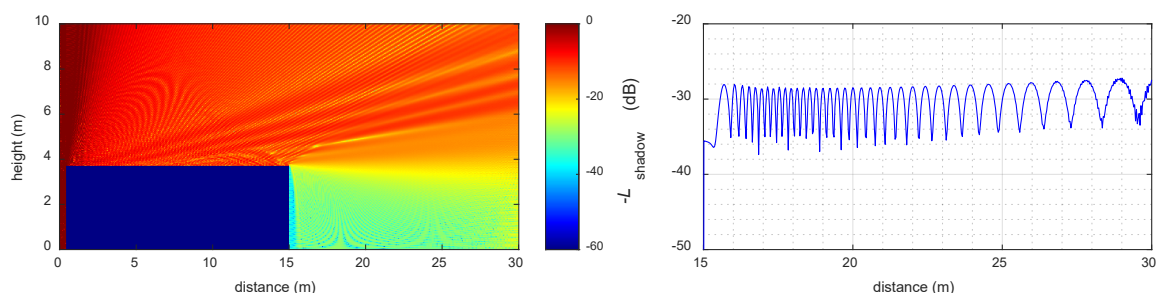


Abb. 14: Dämpfung durch Beugung bei 5,8 GHz

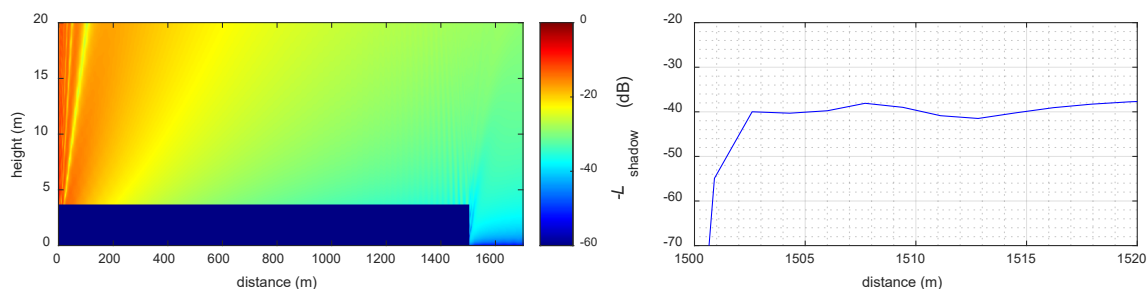


Abb. 15 Dämpfung durch Beugung bei 169 MHz

Beispielhaft für alle Messungen sind in den beiden Abbildungen (Abb. 14, Abb. 15) das simulierte Dämpfungsverhalten bei 5,8 GHz und 169 MHz dargestellt. Oben befindet sich die erste Kante in 0,5 m Entfernung. Die rechte Abbildung zeigt die Dämpfung nach der zweiten Kante in 2,5 m Höhe. Unten befindet sich die erste Kante in 2,5 m Entfernung. Die rechte Abbildung zeigt die Dämpfung nach der zweiten Kante in 2,5 m Höhe.

Aufbau der Messung und experimentelle Ergebnisse:

Die Messungen wurden im Eisenbahnmuseum von Schwarzenberg, ca. 20 km südlich von Chemnitz, durchgeführt. Das Szenario besteht aus fünf Waggon, die zwischen dem Sender und dem Empfänger platziert sind. Abb. 16 zeigt eine allgemeine Darstellung des Messaufbaus sowie ein Bild des Standorts.

Die Sendeantenne befand sich etwa 1-2m hinter dem ersten Wagen, während die Empfangsantenne 1-2m hinter dem letzten Wagen angebracht war. Die Entfernung vom ersten bis zum letzten Wagen beträgt ~64 m. Die Messungen wurden für drei Frequenzen durchgeführt: 169 MHz, 868 MHz und 2450 MHz. Für die Frequenzen 169 MHz und 2450 MHz wurden Rundstrahlantennen verwendet, während für 868 MHz Richtantennen mit einer Neigung von 45° zur Oberseite der Wagen verwendet wurden.

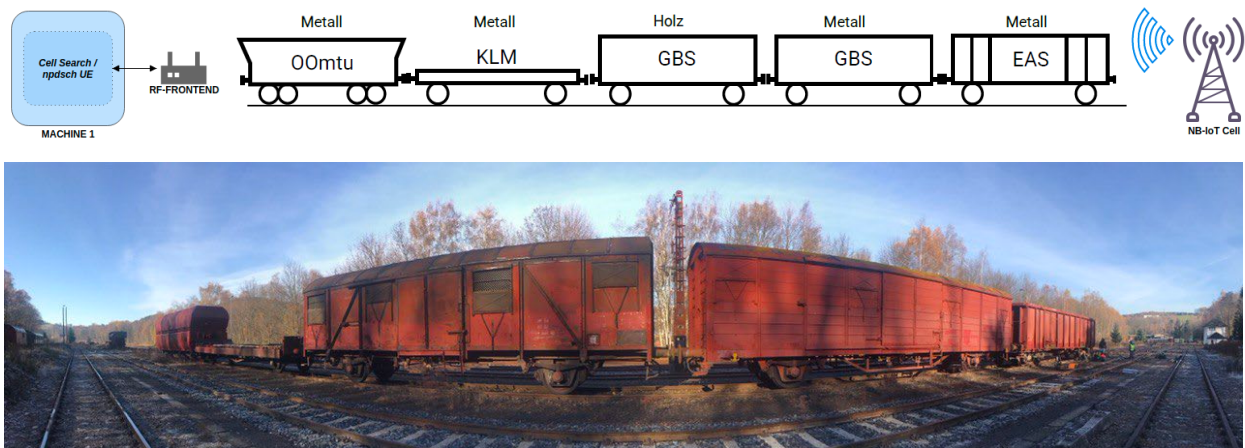


Abb. 16: generischer Messaufbau (oben) und Panoramabild der Vor-Ort-Messung (unten)

Für die Übertragung wurde eine LTE-Technologie, insbesondere das Schmalband-Internet-der-Dinge (NB-IoT), auf den USRP-Geräten (Universal Software Radio Peripheral) mit einem auf die zugehörigen Trägerfrequenzen zentrierten Ressourcenblock eingesetzt. Der Vorteil von NB-IoT gegenüber LTE besteht darin, dass ein Nutzergerät (user equipment, UE) nicht unbedingt die gesamte LTE-Übertragungsbandbreite nutzen muss. Bei NB-IoT kann dem UE nur ein Ressourcenblock mit einer Bandbreite von 200 kHz (einschließlich 20 kHz Schutzband) zugewiesen werden, was den Stromverbrauch des UE reduziert. Darüber hinaus ist gemäß der Verordnung Vfg 12/2020 der Bundesnetzagentur bei den Frequenzen 169 MHz und 868 MHz das verfügbare LoRA/ISM-Band mit 10-25mW Sendeleistung auf nur 412 kHz bzw. 200 kHz begrenzt (Vfg. 12/2020, 2020).

Auf der Senderseite stellen wir die Ausgangssendeleistung (Antenne) mit -10 dBm (169 MHz), -7 dBm (868 MHz) und 17 dBm (2450 MHz) ein. Auf der Empfängerseite messen wir zunächst die Intensität des Empfangssignals mit einem Spektrumanalysator, der die entsprechende 200-kHz-Bandbreite erfasst. In Tabelle 6 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** sind die Ergebnisse der Messungen der Empfangsleistung zusammengefasst. Die Messwerte auf dem Bildschirm des Spektrumanalysators wurden beobachtet und in einer Excel-Tabelle aufgezeichnet. Die Tabelle 6 zeigt zudem, dass die theoretischen Berechnungen den Messergebnissen recht nahekommen. Die größte Abweichung wird bei der Frequenz 2450 MHz beobachtet, wo eine Abweichung von 9-13 dB besteht. Der Grund für diese Diskrepanz lässt sich dadurch erklären, dass der Beugungsverlust im dreidimensionalen Raum kleiner ist als bei den zweidimensionalen theoretischen Berechnungen der Beugung. Dieser Unterschied bei der 2450-MHz-Frequenz ist deutlicher, weil die Signalwellenlänge bei 2450 MHz viel kleiner ist und daher weniger Beugungsverluste im Vergleich zu den Frequenzen 169 MHz und 868 MHz aufweist.

Frequenz	169 MHz	868 MHz	2450 MHz
Sendeleistung (dBm)	-10	-7	17
Rx Antennengewinn (dBi)	3	6	3
Empfangsleistung (dBm)	-82±1	-80±5	-90±2
Ausbreitungsverlust (dB) (Messung)	75±1	79±5	110±2
Ausbreitungsverlust (dB) (Theorie)	54(FSPL)+19(KE)= 74	68(FSPL)+16(KE)= 84	77(FSPL)+22(KE)= 99

Tabelle 6 Ergebnisse der Empfangsleistung und Vergleich mit den theoretisch, berechneten Werten

Die Messungen der Empfangssignalqualität mit einem USRP-Gerät auf der Empfängerseite sind in Abb. 17 und Abb. 18 dargestellt. Dabei sind das Histogramm der Referenzsignal-Empfangsqualität (reference signal received quality, RSRQ) und das Signal-Rausch-Verhältnis (signal to noise ratio, SNR) auf die Fläche der Histogramme normiert. Wie man sieht, führt eine hohe Sendeleistung bei der Trägerfrequenz von 2450 MHz über eine Entfernung von 68 Metern zu einem konzentrierteren RSRQ-Histogramm als bei den beiden niedrigeren Frequenzen. Andererseits zeigen die SNR-Messergebnisse auch, dass die Standardabweichung des SNR bei 2450 MHz verglichen zu den beiden anderen Trägerfrequenzen am größten ist (man beachte auch den Bereich der x-Achse des Histogramms). Eine solch große Standardabweichung kann zu einer sporadischen Instabilität der Funkverbindung zwischen Sender und Empfänger führen. Bei niedrigeren Frequenzen, z. B. 169 MHz, sind die RSRQ- und SNR-Mittelwerte im Allgemeinen niedriger als bei 2450 MHz, was hauptsächlich auf die geringere Sendeleistung und die höheren Beugungsverluste zurückzuführen ist. Dennoch könnten diese RSRQ- und SNR-Werte für eine sporadische Übertragung mit niedriger Datenrate immer noch ausreichend sein.

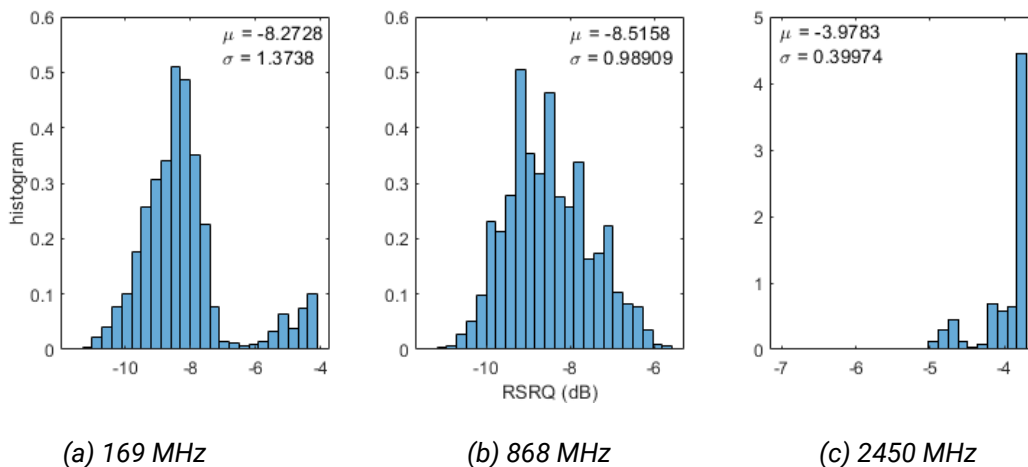


Abb. 17: RSRQ-Messungen. μ und σ bezeichnen den Mittelwert bzw. die Standardabweichung

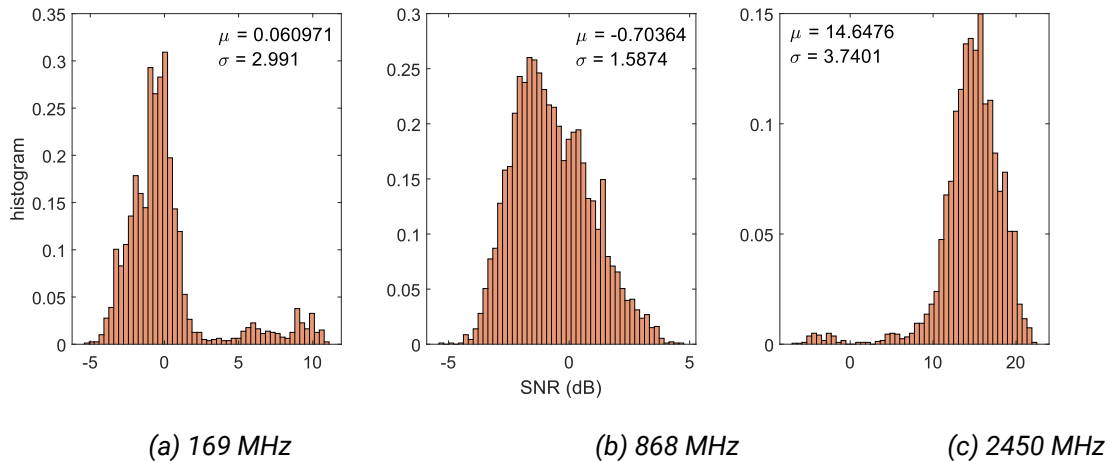


Abb. 18: SNR-Messungen. μ und σ bezeichnen den Mittelwert bzw. die Standardabweichung

Fazit:

Die experimentellen Ergebnisse zeigen eine Genauigkeit von über 90 % der theoretischen Ergebnisse. Darüber hinaus deuten die Ergebnisse darauf hin, dass die Funkkommunikation trotz starker Signalbehinderung zwischen den Wagen möglich ist. Die Bewertung der Systemleistung in Bezug auf die Stabilität der Funkverbindung, die Datenrate und die Latenzzeit konnte in hier nicht untersucht werden.

2.3 Arbeitspaket 3: Demonstrator

Im dritten Arbeitspaket wurde der Demonstrator gemeinsam mit dem Auftragnehmer Ingenieurbüro Weißflog entwickelt. Hierfür wurde zunächst das Lastenheft auf Basis von AP 2 mit konkreten technischen Spezifikationen finalisiert. Grundsätzlich besteht der TIMS-Demonstrator aus einem Head-of-Train-Device (HoT) und zwei End-of-Train-Devices (EoT), die sowohl über eine Mobilfunkverbindung als auch über LoRa-Communication als reine On-Board-Lösung miteinander kommunizieren. Der hardwareseitige Aufbau der drei Geräte ist identisch. Die Ermittlung des Abstands der EoT-Devices vom HoT-Device erfolgt über mehrere Methoden, die sich technisch unterscheiden. Dies ermöglicht bei Tests einen Vergleich der Eignung der Methoden in Abhängigkeit von Umgebungsbedingungen und weiteren Parametern. Weiterhin bestünde somit für spätere TIMS-Vollversionen die Möglichkeit der redundanten Längenermittlung. Die drei Messmethoden sind:

- LoRa-Messung über RSSI (Received Signal Strength Indicator): Auswertung der Signaldämpfung der On-Board-Funkkommunikation und Rückschluss auf Abstand der einzelnen Knoten
- GPS-Positionsmessung am HoT und am EoT mit Korrekturdienst SAPOS; Übermittlung der Koordinaten zum HoT und Ermittlung des Abstands dieser Positionen
- Beschleunigungssensor: Ermittlung der Beschleunigung an HoT und EoT; doppelte Integration und Prüfung auf Übereinstimmung

Für den Demonstrator des TIMS wurden State-Diagramme und konkrete Ablaufdiagramme erstellt um das Zusammenwirken der einzelnen Technologien verständlich zu machen. Es folgt ein Auszug aus dem Lastenheft mit den wichtigsten technischen Spezifikationen:

- Rahmenbedingungen:
Umgebungstemperatur gemäß Bahnnorm EN 50125-1; weitere Umweltbedingungen gemäß Normen; Brandschutzangaben gemäß EN 45545-5; Anzeige, Bedienung, Maße und Befestigungsmöglichkeit der EoT-Devices in den Laschen für Zugschlussscheiben; Akku-Betrieb und -Haltbarkeit für einen Erprobungstag (24h)
- Datenübertragung:

- On-Board-Funkverbindung LoRa-P2P 169 MHz LoRa-Modulation (FSK, GFSK, GMSK, MSK, OOK) bevorzugt mit Band D sowie 868 MHz LoRa-Modulation (CCS) bevorzugt mit Band L
- Zellulare Verbindung mit LTE/5G
- Antennentechnik: SMA-Konnektoren, Rundstrahlantennen im Gehäuse verbaut
- Längenermittlung:
 - Beschreibung der Längenermittlung aus den GNSS-Koordinaten von HoT- und EoT-Modulen und des Korrekturdienstes SAPOS die Längenberechnung findet nur im HOT statt
 - Beschreibung des RSSI-Messprinzips
 - Spezifikationen zu LoRa- und GNSS-Modulen, zu SX1276-Transceiver und zum Raspberry-Pi als zentraler Rechner

Die technische Komplexität der einzelnen geforderten Technologien für die korrekte Funktion des Demonstrators warf Kompatibilitätsprobleme auf – dies war vor Beginn des Arbeitspaketes so nicht absehbar und zog außerplanmäßigen zusätzlichen Aufwand nach sich: Einzelne Hardwarebausteine mussten entweder angepasst oder sogar ersetzt werden, um mit dem Hauptprozessor des Demonstrators korrekt zu funktionieren. Zudem mussten softwareseitig Treiberbausteine einzelner Funkmodule neu programmiert werden, um in das vorgesehene Hardwaresetup zu passen. Durch anhaltende Beschaffungsprobleme diverser Elektronik war es zudem nicht möglich, die gewünschte Konfiguration an Hardware im Demonstrator anzuwenden. Entsprechende Substitute wurden zwar gefunden, erforderten aber auch zusätzlichen Integrationsaufwand.

Die Inbetriebnahme der Hardware und der einzelnen Technologien des TIMS-Demonstrators erfolgte bereits während der Entwicklung, iterativ (siehe Kapitel 1) gemeinsam mit dem IB Weißfog.

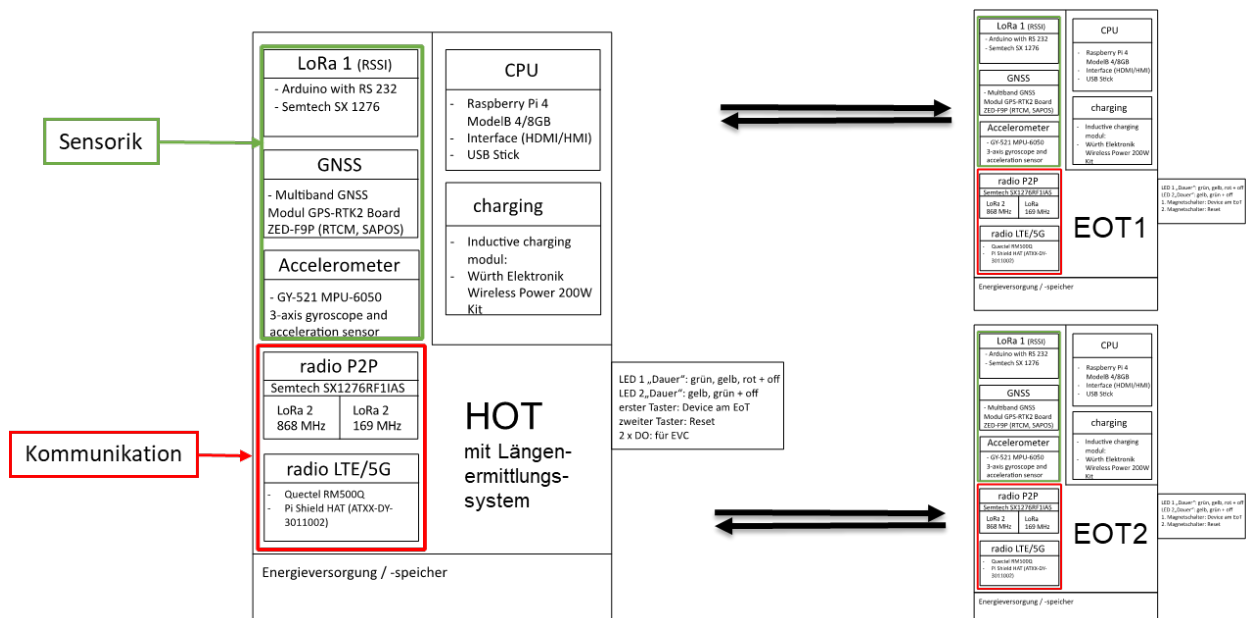
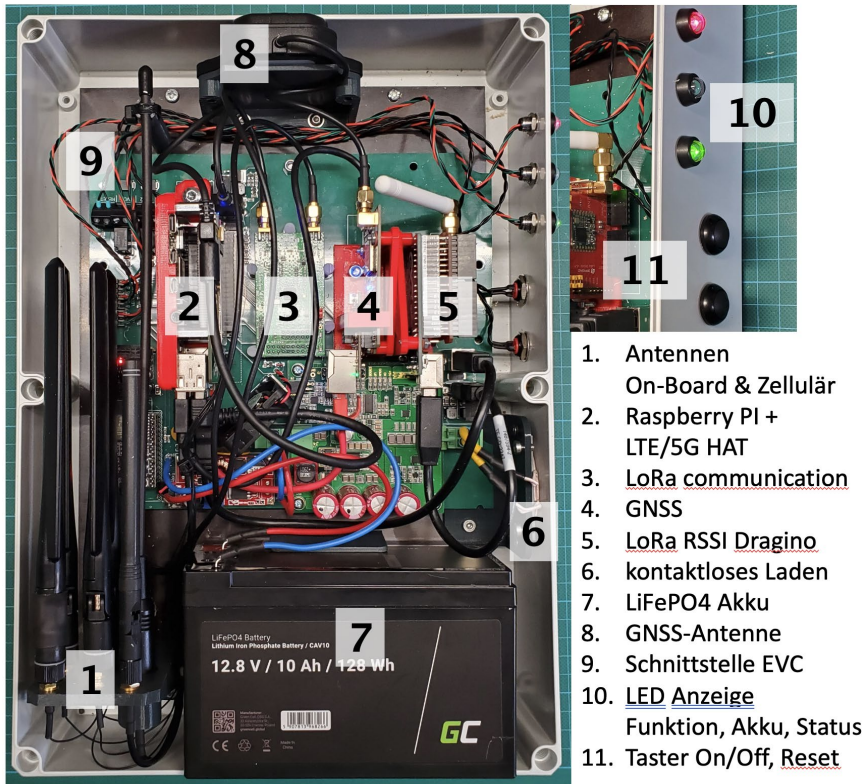


Abb. 19 Demonstrator Hardware Konzept

Alle Elektronikmodule der oben beschriebenen Technologien wurden auf ein motherboard aufgebracht. Die Einzelmodule sind sog. „Entwicklerboards“ mit entsprechendem Platzbedarf.



1. Antennen
On-Board & Zellulär
2. Raspberry PI +
LTE/5G HAT
3. LoRa communication
4. GNSS
5. LoRa RSSI Dragino
6. kontaktloses Laden
7. LiFePO4 Akku
8. GNSS-Antenne
9. Schnittstelle EVC
10. LED Anzeige
Funktion, Akku, Status
11. Taster On/Off, Reset

Abb. 20 Bauweise eines TIMS-Knotens

Eine Anforderung an den Demonstrator war, dass ein Knoten alle Technologien und deren Peripherie sowie zugehörige Antennen und die Energieversorgung in einem wetter- und stoßfestem Gehäuse aufnimmt. Das gewählte Polycarbonat Gehäuse hat eine Abmessung von 362x254x109 mm und passt somit in die vorgegebene Hüllfläche der Zugschlussscheibe nach TSI an Güterwagen. Der Demonstrator lässt sich per Taster von außen bedienen. Dabei geben insgesamt drei LED die Funktion und den Status des einzelnen Knotens und des TIMS-Demonstrators wieder. Durch eine kontaktlose Ladeeinheit kann der Akku sicher geladen werden, ohne dass eine Öffnung des Gehäuses notwendig ist. Dies könnte im bahnbetrieblichen Alltag bei entsprechender Ausgestaltung der äußeren Ladeeinheit auch unter widrigen Wetterbedingungen, eventuell sogar direkt am Fahrzeug geschehen.

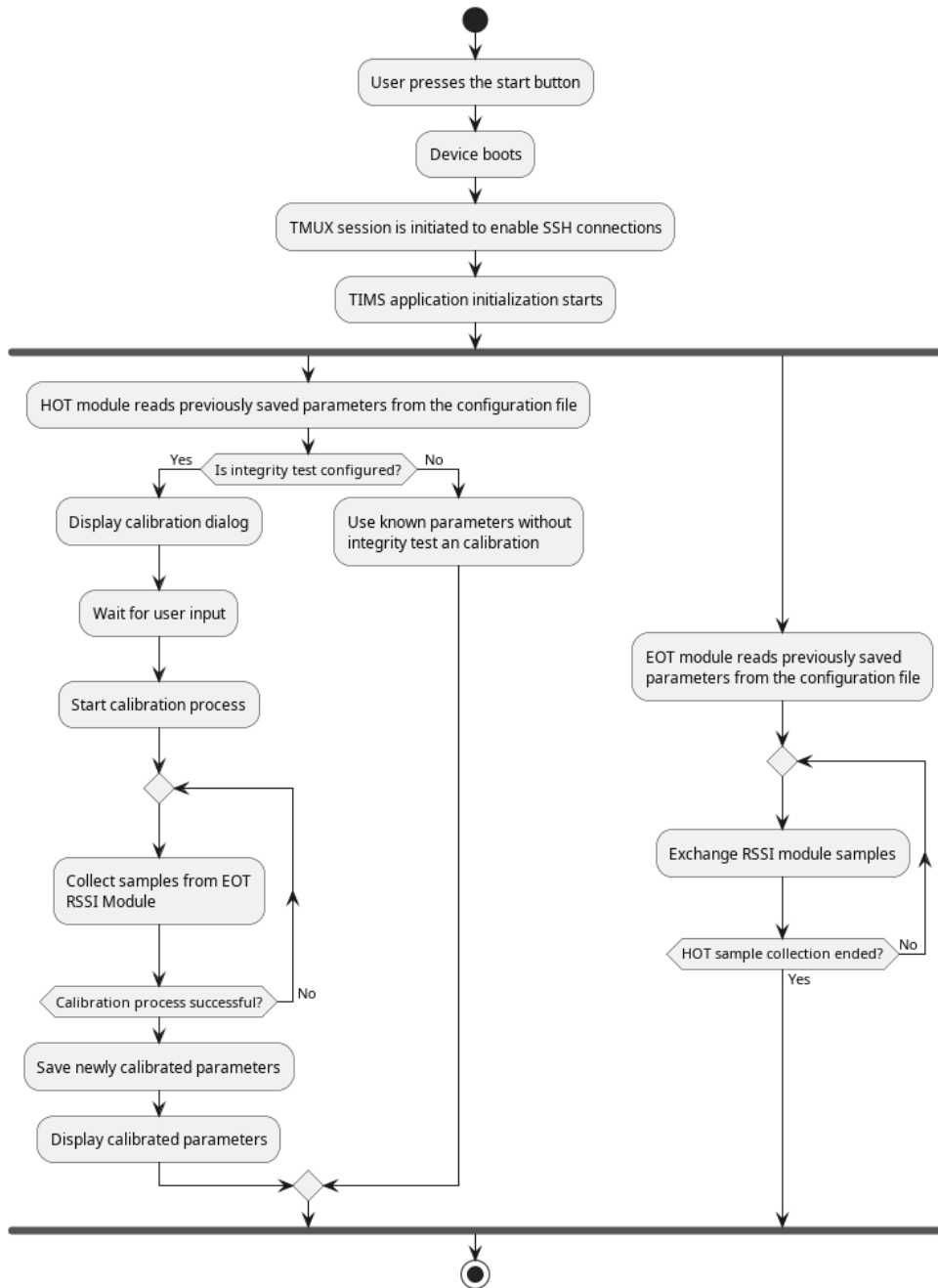


Abb. 21 workflow Messvorgang mit Demonstrator

In der Abb. 21 ist ein Start eines Messvorgangs in einem Diagramm dargestellt. Sobald die Verbindung aufgebaut ist, leuchten an allen drei Geräten als visuelle Kontrolle die jeweils oberer LED grün. Die Speicherung der Daten in einem zentralen log-file beginnt sofort nach jedem Hochfahren der Geräte.

2.4 Arbeitspaket 4: Erprobungsprogramm

Im Oktober 2022 folgte der Auftakt zum AP 4, parallel zum laufenden AP 3. Es wurden ein komplexer Messaufbau und mehrstufige Tests vorgesehen. Im Verlauf des Jahres 2023 wurden die Einzelschritte des Versuchsverlaufs und der anzupassenden Vorgehensweise bei der Versuchsdurchführung innerhalb von Workshops festgelegt. Testfälle für die Versuchsfahrten sind aus der TIMS-Spezifikation ableitbar.

Die Erstellung eines Erprobungsprogramms musste den iterativen Ansatz der Demonstratorentwicklung berücksichtigen. Es mussten Versuche außerhalb eines Labors, aber ohne Notwendigkeit von eisenbahnbetrieblichen Abstimmungs- und Genehmigungsprozessen gefunden werden, um mögliche Iterations Schleifen zu verkürzen. Es wurde daher ein fünfstufiges Erprobungsprogramm entwickelt:

1. Vorüberprobungen und Messungen
2. Vergleich und Bewertung von Messvarianten
3. Feldversuche statische Funktionstests der Komponenten
4. Feldversuche dynamische Testfahrten Digital Rail Convention (DRC) (siehe Kapitel 5)
5. Erprobung bei Messfahrt Schwarzenberg – Annaberg-Buchholz Süd (siehe Kapitel 5)

Vorüberprobungen

Viele Tests und Messungen zu den einzelnen Technologien wurden bereits parallel zur Erstellung des Erprobungsprogramms in den AP 2 und 3 durchgeführt. Es wurden viele Messungen vor Ort durchgeführt, um die richtigen Komponenten und Materialien zu identifizieren. Beispielsweise wurden verschiedene einfache Tests in der Umgebung des IB Weißflog (kein Eisenbahnumfeld) durchgeführt, um den Demonstrator in mehreren Test-Iterationsstufen auf möglichst einfache und kostengünstige Weise grundsätzlich funktionstauglich zu machen. Dabei stand bei den durchgeführten Vorabmessungen die aufwendige Analyse der Migrierbarkeit hin zur bahnbetrieblichen Anwendbarkeit im Fokus.

April 2022 – LoRa-Simulation/Messung

Die LoRa-Drahtloskommunikation zwischen EoT und HoT ist ein Kernstück des TIMS-Demonstrators. Dabei wurden folgende Werte per Simulation (siehe Kapitel 2.2.2) für verschiedene Trägerfrequenzen berechnet:

- Freiraumdämpfung und Verluste durch Beugung an Hindernissen
- notwendige Übertragungsleistung

Ziel der Vorüberprobung war die Charakterisierung der Systemumgebung der Drahtlosübertragung und die Validierung von Simulationsparametern. Für verschiedene Konfigurationen konnten Prognosen zur Leistungsmessung und Datendurchsatz getroffen werden, die als Bewertungsgrundlage für den Systementwurf dienen. Beispielsweise konnte der Einfluss Position der Sender/Empfänger berücksichtigt werden.

In der Fortführung der Messkampagne konnte eine Analyse der Abstandsmessung zwischen HoT und EoT mit RSSI-basiertem LoRa erfolgen. Alle Ziele der Messung wurden erreicht:

- Bestimmung der Pathloss Reference und des Pathloss Exponenten
- Tests der RSSI-Funktionalität bei LoS (Line of Sight) und NLoS (Non Line of Sight) in Bezug auf die Genauigkeit
- Datenbank für RSSI-Messungen erstellen
- RSSI-Messungen und Abstand-Messung analysieren

Vergleich und Bewertung von Messvarianten

September 2022 Referenzmessungen mit hochgenauem GNSS, SZB

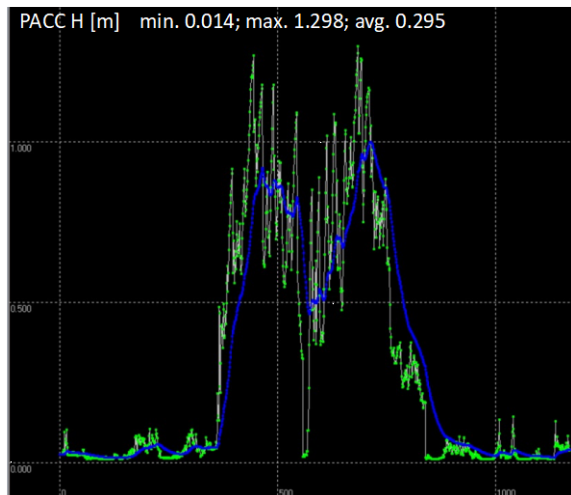
Vor den Messungen in der geplanten Testumgebung des Eisenbahnmuseums Schwarzenberg mussten Referenzwerte ermittelt werden. Zur Ermittlung von validen Referenzpositionen erfolgte im September 2022 die Aufnahme einer Referenzstrecke im Umfeld der Eisenbahnmuseums Schwarzenberg. Dabei wurden Messungen mit einem Leica RTK-Rover und 2 cm-3D-Genauigkeit durchgeführt. Auf einer Geraden von 750 m Länge wurden so 16 Referenzpunkte eingemessen.



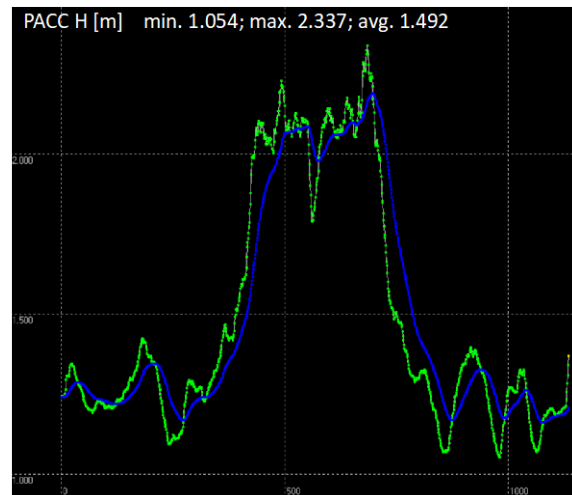
Abb. 22 GNSS-Referenzmessung Schwarzenberg

Mai 2023 - GNSS/SAPOS-Messung standalone, Bahnstrecke KW

Eine der ersten Vorabmessungen auf der realen Eisenbahnstrecke war die alleinstehende GNSS/SAPOS-Messung auf der Strecke zwischen Königswalde und Bärenstein. Hierbei wurden variable Bedingungen hinsichtlich Wetter, Geschwindigkeit und DGNSS berücksichtigt und die Position mittels u-blox F9 high precision GNSS-Modul ermittelt. Dabei kamen erstmals SAPOS-Korrekturdaten zum Einsatz. Die Vorabmessung diente der Verfeinerung der Softwarekonfiguration des Demonstrators in AP 3. Im Ergebnis konnte gezeigt werden, dass durch die Nutzung von SAPOS-Korrekturdaten die mittlere Positionsungenauigkeit der GNSS-Lösung minimiert werden konnte (Abb. 23). Die mittlere horizontale Genauigkeit der Position des Rovers ist bei Anwendung von SAPOS (HEPS)-Korrektur auf der gewählten Teststrecke um mehr als 1m verbessert worden. Gemessen wurde sekundlich bei einer Geschwindigkeit von ca. 10 km/h. Die blaue Linie in zeigt den gleitenden Mittelwert der letzten 16 Messungen. Es wurden an zwei Tagen je 3 Versuche durchgeführt und dabei kein wesentlicher Einfluss der Wetterbedingungen festgestellt.



DGNSS (SAPOS), stark bewölkt



kein DGNSS, stark bewölkt

Abb. 23 Ergebnisse Messung mit und ohne SAPOS-Korrekturdaten

Feldversuche statische Funktionstests der Komponenten

Labortests TU Chemnitz

Ab Juli 2023 konnten dann alle Entwicklungsmodule als Gesamthardware nicht nur in das Gehäuse integriert werden, es war dann auch möglich alle devices als fertigen Demonstrator zu nutzen. Dennoch gab es gerade hier Anlaufschwierigkeiten. Die Soft- und Hardwarebugs wurden in den folgenden Versuchen detektiert und konnten schrittweise abgestellt werden.

Juli 2023 – 1. Feldversuch Drehscheibe bis 740m, SZB

Bei diesem Versuch erfolgten erstmal Messungen im Realumfeld unter Berücksichtigung von Abschattungen. Bei den statischen Messungen im Eisenbahnmuseum Schwarzenberg wurde ein Waggon auf einer Drehscheibe positioniert und diente als reales Hindernis für die Wellenausbreitung. An diesem wurde ein Teil des Demonstrators als digitale Zugschlussscheibe (EoT-Modul) angebracht. Der zweite Teil des Demonstrators, wurde schrittweise, entlang der vorab eingemessenen Referenzpunkte (siehe Referenzmessungen mit hochgenauem GNSS) vom Waggon entfernt. Dabei wurden eine Kalibrierung des RSSI-0 vorgenommen und ein zentrales Logfile erprobt. Der 1. Feldversuch offenbarte Probleme bei der LoRacomm-Verbindung und GNSS-Genauigkeitsabweichungen bis 20 m. Durch Prüfung der einzelnen log files fiel auf, dass etwa die Positionsgenauigkeit der einzelnen Geräte dennoch sehr gut war. Lediglich die Übertragung dieser Werte in den Anzeigemonitor war stark zeitverzögert. Anhand dieser Beobachtung konnten Fehler in der Datenverarbeitung der Geräte behoben werden.

September 2023 – 2. Feldversuch Drehscheibe bis 740m, SZB

Im zweiten Feldversuch wurden Messungen analog zum 1. Feldversuch vorgenommen und alle Daten in einer zentralen Logdatei abgelegt (LTE, LoRa comm, GNSS, ACC, LoRa-RSSI). Damit ist eine gezielte Auswertung im Nachgang zur Messung möglich. Aufgrund der eingemessenen Referenzpunkte wurde eine Einschätzung über die Leistungsfähigkeit der Nachrichtenübertragung und die Genauigkeit des Längenmesssystems des TIMS möglich. Leider konnte auch bis hierhin der Fehler mit der LoRacomm-Verbindung noch nicht behoben werden und die Kommunikation der Module lief ausschließlich über die LTE/5G Verbindung. Mit den gewonnenen Werten wurden die weitere Vorgehensweise und der dynamische Aufbau der folgenden Messreihen anhand des Konzeptes bestimmt. Mit diesem Aufbau wurde eine Messung bis ca. 750 m Länge in einer entsprechenden Umgebung möglich. Als Basis für die abgelaufene Strecke diente wieder die Referenzmessung aus dem September 2022 und ist in Abb. 24 zu sehen.

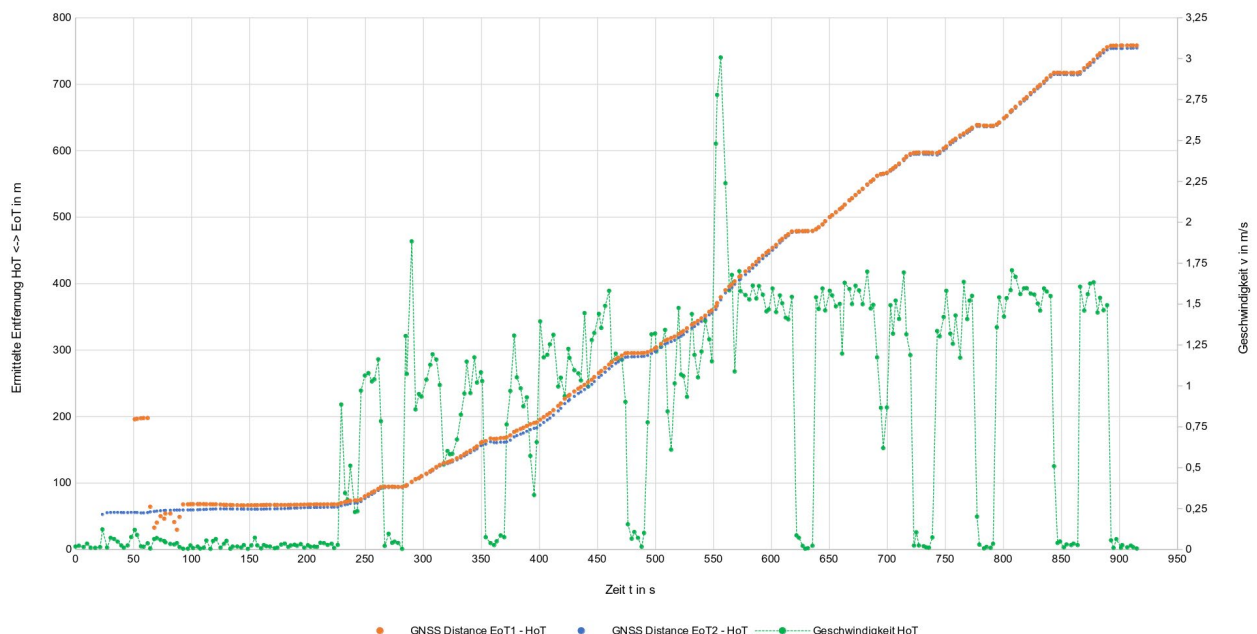
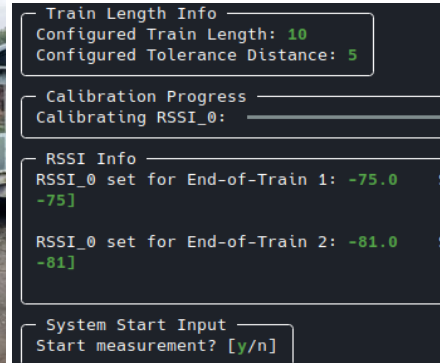


Abb. 24 Feldversuch Drehscheibe

Die Genauigkeiten der Positionen und somit auch der Längenberechnung, also Abstand der jeweiligen devices zueinander konnte im Vergleich zum Vorversuch wesentlich verbessert werden. Es wurde gezeigt, dass eine statische Entfernungsmessung ohne Probleme bis 740m mit den GNSS Messsystem mittels LTE übermittelt möglich ist. Die LoRa-RSSI Messung hingegen unterlag starken Schwankungen, die nicht zuletzt auf den geänderten Ausbreitungsbedingungen bei sich ständig ändernden Abstand zurückzuführen sind. Es bestätigt sich die theoretische Vermutung, dass eine Kalibrierung jeden Zustand der Messung (geänderter Abstand etc.) notwendig ist. Im Bild oben ist die gemeinsame Änderung der Länge (blau/orange) zu sehen, da sich der HOT simultan zu den beiden EOT's entfernt. Die grüne Linie ist die Änderung der Geschwindigkeit des HOT-Knotens. Diese sinkt auf „0“ ms bei den jeweiligen Messpunkten. Hier wurde je ca. 30 Sekunden verharret, ehe sich in Schrittgeschwindigkeit zum nächsten Messpunkt bewegt wurde.

Die nachfolgenden Feldversuche mit dem Demonstrator werden in AP 5 beschrieben.

2.5 Arbeitspaket 5: Erprobung; Begleitforschung

Die Hauptaufgaben im AP 5 bestehen in der Systembereitstellung, dem Betriebseinsatz und der Begleitforschung zum Einsatz des TIMS-Demonstrators in seiner Testumgebung. Dabei ist eine enge Verzahnung mit AP 4 erforderlich.

Im Sommer 2023 konnte mit den ersten vollumfänglichen Tests mit dem Demonstrator gemäß Erprobungsprogramm begonnen werden. Für die Erprobungen kam erschwerend hinzu, dass Tests im Eisenbahnumfeld aufgrund der eisenbahnbetrieblichen Abstimmungen nicht spontan organisierbar sind und notwendige Anpassungen am Demonstrator zeitaufwendig sind. In diesem Sinne hatte sich das iterative Verfahren aus dem AP 4 – Erprobungsprogramm bewährt, da es unabhängige Voraberprobungen ermöglicht.

Bis zum Schluss des Projektes konnte leider die on-board LoRa Funkverbindung zum reinen Datenaustausch nicht entsprechend konfiguriert werden. Diese blieb in den Versuchen abgeschaltet, sodass weitere Funktionen nicht beeinträchtigt wurden und der workload der Geräte nicht unnötig vergrößert wurde.

2.5.1 Feldversuche dynamische Testfahrten DRC

September 2023 – Vorführung im Rahmen der Digital Rail Convention, Schlettau

Im Rahmen der vom SRCC ausgerichteten Digital Rail Convention (DRC) im September 2023 konnte der Demonstrator zum ersten Mal im vollen Funktionsumfang mit einem eisenbahntypischen Aufbau getestet und vorgeführt werden. Zu dieser Fachtagung mit ca. 300 z. T. internationalen Teilnehmern aus dem Eisenbahn-/Verkehrssektor wurde ein Workshop zum Thema TIMS durchgeführt. Am sogenannten Demo Day der DRC wurden weitere dynamische Messungen bei Tests bei Rangierfahrten im Bahnhof Schlettau durchgeführt. Diese dienten zugleich der öffentlichen Projektdemonstration vor einem Fachpublikum. Bei diesen Tests fuhr eine Rangierlokomotive der Baureihe 107 mit einem Güterwaggon im Bahnhof auf und ab.

Für die Versuche wurde ein Testablauf mit gekuppelten und ungekuppelten Fahrten erstellt: Bei einigen Fahrten wurde der Waggon von der Lokomotive getrennt. Somit konnte anschaulich gezeigt werden, dass das TIMS mit den entsprechenden HoT/EoT-Devices auf Lokomotive und Waggon die Integrität dieses Zugverbands korrekt gegeben bzw. verloren melden. Die Kommunikation untereinander und die Funktion der Messtechnik konnten demonstriert werden.

TIMS Demonstrator Version 1.1									
Status					Evaluation				
Node	Network	5G RSSI	LoRa Comm	Battery	Evaluation	Train Length	Tolerance Distan.	GNSS Distance	Train Integrity
HOT	LTE	-49 dBm	0 dBm	13.3 V	HOT -> EOT	34	10	34,284 m	VALID
EOT	LTE	-55 dBm	0 dBm	13.27 V	HOT -> Z	-	-	114.417 m	-
Z	LTE	-58 dBm	0 dBm	13.32 V					
GNSS Module									
Node	Latitude	Longitude	Speed	Fix Type	Fix applied	Satellites	Horizontal Accuracy	Vertical Accuracy	
HOT	50.554913 °	12.953495 °	0.01 m/s	3D / FLOAT	APPLIED	31	1 cm	2 cm	
EOT	50.555078 °	12.953086 °	0.02 m/s	3D / FIXED	APPLIED	32	1 cm	1 cm	
Z	50.554556 °	12.955009 °	0.0 m/s	3D / FIXED	APPLIED	32	1 cm	1 cm	
RSSI Module					Acceleration Module				
Node	RSSI		Distance		Node	Acceleration X	Acceleration Y	Acceleration Z	
HOT -> EOT	-100 dBm		19.12 m		HOT	0.0 m/s²	0.0 m/s²	0.0 m/s²	
HOT -> Z	-96 dBm		187.52 m		EOT	0.0 m/s²	0.0 m/s²	0.0 m/s²	
					Z	0.0 m/s²	0.0 m/s²	0.0 m/s²	

Abb. 25 TIMS Live Monitor während DRC

Die Live-Messdaten gibt der Demonstrator über eine SSH-Verbindung aus. Auf diese Weise konnten diese Daten zur öffentlichen Projektdemonstration den Zuschauern über einen großen Monitor (Abb. 25) präsentiert werden. Dargestellt werden die Werte für die LoRa-Signalstärke, die daraus ermittelte Zuglänge, die ermittelte GNSS-Distanz aus deren Koordinaten, die GNSS-Geschwindigkeit, Werte des Beschleunigungssensors, Batterieladezustand etc. Bei den Versuchen im Rahmen der DRC wurde eines der beiden EoT-Devices im Informationszelt bei dem Monitor aufgestellt, was eine Zentrale repräsentierte.



Abb. 26 Konfiguration der ersten Realdemonstration

Im Nachgang zu den Tests wurden die Log-Files mit allen Messwerten aus dem Demonstrator analysiert, um ein Verständnis für die Funktionsweise, mögliche Fehler und Verbesserungsmöglichkeiten sowie die Behebung systematischer Fehler zu erreichen. Anschließend wurden jeweils entsprechende Änderungen zur Weiterentwicklung des Demonstrators vorgenommen.

Die Messdaten werden in Logfiles mit hinterlegten Zeitstempel gespeichert. Aus ihnen lassen sich unter anderem folgende Werte für AP 6 bereitstellen:

- GNSS-Zuglänge und Geschwindigkeit über die Zeit
- Abweichung der einzelnen GNSS-tracks aus Koordinaten
- Abgleich der einzelnen Beschleunigungswerte
- LoRa-Distanz über die Zeit

2.5.2 Erprobung bei Messfahrt Annaberg – Schwarzenberg

08. Dezember 2023 - Messfahrt mit BR 772

Nachdem Erkenntnisse aus diesen Tests zusammengefasst wurden, konnten im AP 4 weitere Testfahrten im November und Dezember 2023 spezifiziert werden. Ziel war es hierbei, mit einem Schienenbus der Baureihe 772 (Abb. 27), mit einer Länge von 13.55 m, an dessen Spitze und Ende je ein Device positioniert war, die gesamte Teststrecke von Schwarzenberg nach Annaberg-Buchholz Süd und zurück abzufahren und Messdaten aufzunehmen. Die Geräte wurden im Bahnhof Annaberg-Buchholz Süd getauscht, da die Rollen vorab fest zugeordnet sind. Ein weiteres Gerät war im Innenraum des Triebwagens aufgestellt. Dieser Test ermöglichte die dynamische Erprobung mit Einschnitten, Überwaldung entlang der Strecke, sowie Funkzellenwechsel und gibt einen Überblick über den Einfluss der Positionierung der Geräte am/im Fahrzeug und diversen Umgebungsbedingungen. Zudem wurde der Einfluss bei Variation der Geschwindigkeit von Schrittgeschwindigkeit bis max. 40 km/h, sowie im Rangierbetrieb bei weiteren Rangierfahrten im Bahnhof Schlettau untersucht.



Abb. 27 BR 772 mit Demonstrator (EOT 2)

Das im Vorfeld erstellte Versuchsprogramm diente als Basis für die Messdurchführung. Grundlage für die abgeleiteten Testschritte waren die detaillierten UML-Abläufe aus der TIMS-Spezifikation (siehe Kapitel 2.2). Für die einzelnen Messabschnitte nach Messablaufplan, wurden die Geräte neu gestartet und ca. 1 min gewartet, bevor die neue Messung begann. Die SAPOS Korrektur der GNSS-Messungen wurde somit immer sicher angewendet und Genauigkeit der Messungen lag dann immer unterhalb der Toleranzgrenze von 5 m. Die Geräte erstellen damit zudem immer neue log-files, was eine spätere Auswertung einfacher macht. Alle Ereignisse, wurden in einem Logbuch festgehalten. Die Kalibrierung der LoRa-RSSI Messung wurde lediglich vor Fahrtbeginn einmalig am Bahnhof Schwarzenberg durchgeführt und dem Setup dann als Berechnungskonstante für alle weiteren Fahrten zugeordnet. Der Messintervall aller Geräte wurde auf 1/s eingestellt, der Aufnahmeintervall am HOT lag bei ca. 1,5 s. Wie zur DRC (Kapitel 2.5.1) wurde die Fahrt auf einem live Monitor im Fahrzeuginneren über eine SSH-Verbindung übertragen und beobachtet. Die Ereignisse und deren Auswirkung konnten somit besser erkannt und eine erforderliche Reaktion darauf fast zeitgleich ausgeführt werden. Um einen reibungslosen Ablauf zu gewährleisten und so wenig Messausfälle wie möglich zu haben, wurde die Kommunikation ausschließlich über die LTE/5G-Schnittstelle ausgeführt. Die LoRa-comm Verbindung konnte zu diesem Zeitpunkt leider noch immer nicht stabil verwendet werden.

Auch die dabei generierten Messdaten für

- die ermittelte Zuglänge durch die Messsystem GNSS und LoRa RSSI,
- die Abweichung zur genauen Position
- die Satellitensicht
- die Verbindungsqualität der Devices etc.

dienen der gemeinsamen Datenauswertung im AP 6. Dort konnte eine Vielzahl anschaulicher Diagramme/Grafiken zur Visualisierung der Messwerte erstellt werden.

2.6 Arbeitspaket 6: Auswertung

In diesem Arbeitspaket wird sich auf die Auswertung der gewonnenen Daten mit dem Demonstrator konzentriert. Alle erhaltenen Daten, die vor der DRC gewonnen wurden, sind Bestandteil der vorangegangenen Kapitel, oder werden nicht näher betrachtet. Im ersten Abschnitt wird auf die GNSS-Messung/Berechnung eingegangen. Im zweiten Abschnitt folgen dann weitere Betrachtungen der einzelnen Technologien und eine Einschätzung des Gesamtsystems. Die Geräte lieferten gut brauchbare Daten für eine sinnvolle Auswertung, dennoch kam es in regelmäßigen Abständen zu Unterbrechungen im Messablauf oder zum Abbruch bei der Initialisierung. Eine vollständige Funktion aller Mess- und Kommunikationsanwendungen konnte nie gleichzeitig erreicht werden. Somit wurden für Messungen tlw. Einzelfunktionen abgeschaltet, um so einen flüssigeren Messablauf zu ermöglichen.

2.6.1 Auswertung Digital Rail Convention

Der Aufbau zu den Messfahrten zur DRC sind im Kapitel 2.5 näher beschrieben. Im folgenden Abschnitt werden die gewonnenen Messdaten ausgewertet und diskutiert. Dabei wird vornehmlich auf das Gesamtlog-file vom HOT-Koten Bezug genommen. Da der volle Funktionsumfang des Demonstrators zur DRC noch nicht zur Verfügung stand und somit die Auswertung für alle Technologien nicht möglich ist, wird hier ausschließlich die Integrationsfeststellung mittels Messsystem aus den GNSS-Daten beschrieben.

In Abb. 28 ist eine kompakte Übersicht der gewonnenen Datenpakete zu sehen. In Zeitabschnitt 1 fanden die Fahrtvorgänge ausschließlich mit gekoppeltem Fahrzeug statt. In allen weiteren Abschnitten sind auch entkoppelte Fahrten aufgenommen, aus diesem Grund ist die mittlere Distanz aller Messwerte deutlich größer. Weiter soll nun die Auswertung der Zeitabschnitte 1 und 3 stattfinden.

Zeitabschnitt (Zeilenzuordnung zur Auswertung)	betrachtete Zeit (mit dazwischen liegenden Stillstandszeiten)	Zeitdauer in [s] (mit dazwischen liegenden Stillstandszeiten)	Anzahl an Entkopplungen in der Zeitspanne in []	Mittlere Distanz HOT-EOT in [m]	Anzahl Datenwerte in []
1 (2-69)	12:18:00 bis 12:22:00	240	0	34,35	67
2 (71-358)	13:12:00 bis 13:34:00	1320	1	46,67	288
3 (360-1036)	14:17:00 bis 14:56:00	2340	3	51,53	665
4 (1038-1187)	15:21:00 bis 15:39:00	1080	1	48,18	149

Abb. 28 Übersicht Datenpakete zur DRC

Zeitabschnitt 1:

Das Messintervall an beiden Geräten (HOT/EOT1) beträgt 1/s und gilt für alle aufgenommenen Werte, nicht nur für GNSS. Das Support-System für die Ortung, „SAPOS“ war permanent aktiv. Das Diagramm in der Abb. 29, zeigt die Geschwindigkeit und die berechnete Zuglänge aus den GNSS-Werten der Geräte. Alle Geschwindigkeiten unter 0,1m/s sind als Stillstand des Fahrzeugverbandes gewertet worden. Die Ursache hierfür liegt in der Laufzeitschwankung der einzelnen Messpunkte, welche aber in dieser Arbeit nicht weiter untersucht werden. Die grüne und rote Linie gibt die ermittelte Geschwindigkeit wieder. Beide liegen über die gesamte Messdauer nahe beieinander, die maximale Abweichung beträgt 0,15 m/s (0,54 km/h). Die berechnete Zuglänge ist im Zeitabschnitt mit violetten Punkten dargestellt. Es ist festzustellen, dass in einigen Abschnitten die maximale Abweichung bis zu 5m beträgt. Bei genauer Betrachtung fällt auf, dass die Abweichungen im Bereich der Fahrtvorgänge, vor allem bei größer werdender Geschwindigkeit am größten sind. Durch das Fehlen der Zeitsynchronisation der Geräte für die Einzelmessungen (jeder einzelne Messpunkt) werden die Positionswerte aller Geräte zum Zeitpunkt X, fortlaufend in das Gesamtlogfile des HOT eingetragen (siehe 2.3). Die Zeitdifferenz dieser Punkte kann abhängig von der Latenz der Datenübertragung, interne Rechengänge und Zeitstempel am HOT bis zu ca. 1,5 s betragen. Findet in dieser Zeit also eine Positionsänderung des Zugverbandes statt, so können in eine Zeile des Gesamt-log-files zwei unterschiedliche „alte“ Positionen der Einzelgeräte eingetragen werden. Werden nun diese Werte fortlaufend für die Berechnung der Länge genutzt, so ergeben sich Schwankungen im Ergebnis, obwohl die Genauigkeit der Einzelmessung um ein Vielfaches höher ist. Um diesen Effekt, zumindest grafisch entgegenzuwirken, wurde ein gleitender Mittelwert (pink) aus den letzten 10 Messungen dem Diagramm hinzugefügt. Um Rohdatenfehler auszuschließen, wird sich diesem Problem nochmals an späterer Stelle gewidmet. Die mittlere Distanz über dem kompletten Zeitabschnitt 1 ist mit 34,25 m berechnet. Wenn man von einem korrekt gemessenen, physischen Abstand der beiden Geräte von 34 m ausgeht, so erhält man eine Messabweichung von unter 1 %. Vielmehr aber ist davon auszugehen, dass bei der konventionell ermittelten Länge die tatsächliche Abweichung größer ist als die der GNSS-berechnung. Genauer kann dieser Sachverhalt mit den vorliegenden Messdaten leider nicht untersucht werden.

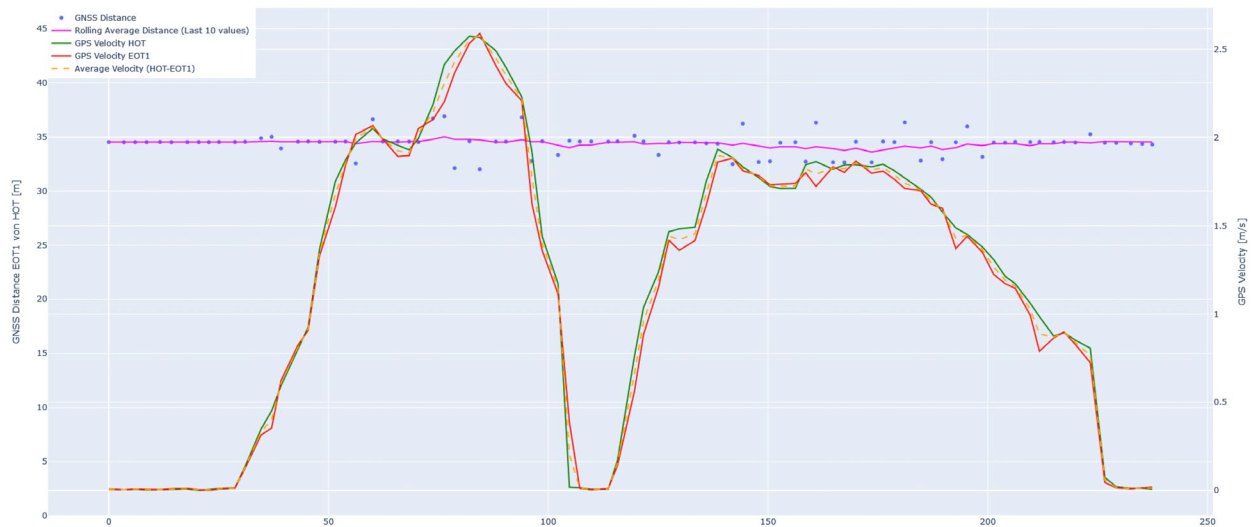


Abb. 29 Zeitabschnitt 1, DRC

Zeitabschnitt 3:

Im folgenden Zeitabschnitt wurde ein Bereich mit 665 Messpunkten ausgewertet. Die Anteile der verlorengegangenen Pakete (z. T. durch Neustart, u. a.) sind nicht in das Diagramm eingeflossen, jedoch wird die gesamte Zeit erfasst. Das Messsetup ist gleich dem Setup aus Zeitabschnitt 1. Es wurden drei Fahrten im abgekoppelten Zustand durchgeführt und die Ereignisse auf dem live Monitor beobachtet. Die maximalen Abweichungen der Geschwindigkeiten der Geräte, bei gemeinsamer Fahrt, liegen ebenfalls unter 0,15 m/s. Im Bereich von ca. 750 s ist ein Messdatenverlust während eines Fahrtvorganges zu sehen. Ein plötzlicher Ausfall des Hauptrechners im HOT konnte als Ursache hierfür gefunden werden. Zu keiner Zeit ist das GNSS-Signal ausgefallen und die Messgenauigkeiten lagen immer weit über den gesetzten Toleranzwerten. Bei den Fahrten mit abgekoppeltem Waggon ist erkennbar, dass die Geschwindigkeit am EOT1 konstant bei 0 m/s bleibt, während sich der Abstand, also die Zuglänge, vergrößert. Die Geschwindigkeit vom HOT hingegen ändert sich und ist bei den Umkehrvorgängen der Lok ebenfalls 0 m/s. Bei den Umkehrvorgängen wurde ein maximaler Abstand von 130 m erkannt. Am Monitor konnten dem Fachpublikum die Live-Werte der Messung gezeigt werden.

Mit einer eingegebenen Längentoleranz von 10 m wurde bei Fahrten ohne Abkopplung immer sicher die Integrität des Fzg.-Verbandes als wahr angezeigt. Bei allen Fahrten mit abgekoppeltem Waggon konnte ebenfalls sicher der Verlust der Integrität detektiert werden. Dies geschah im Mittel bei 44 m, heißt also die Länge des Fzg.-Verbandes von 34 m plus die Längentoleranz von 10 m.

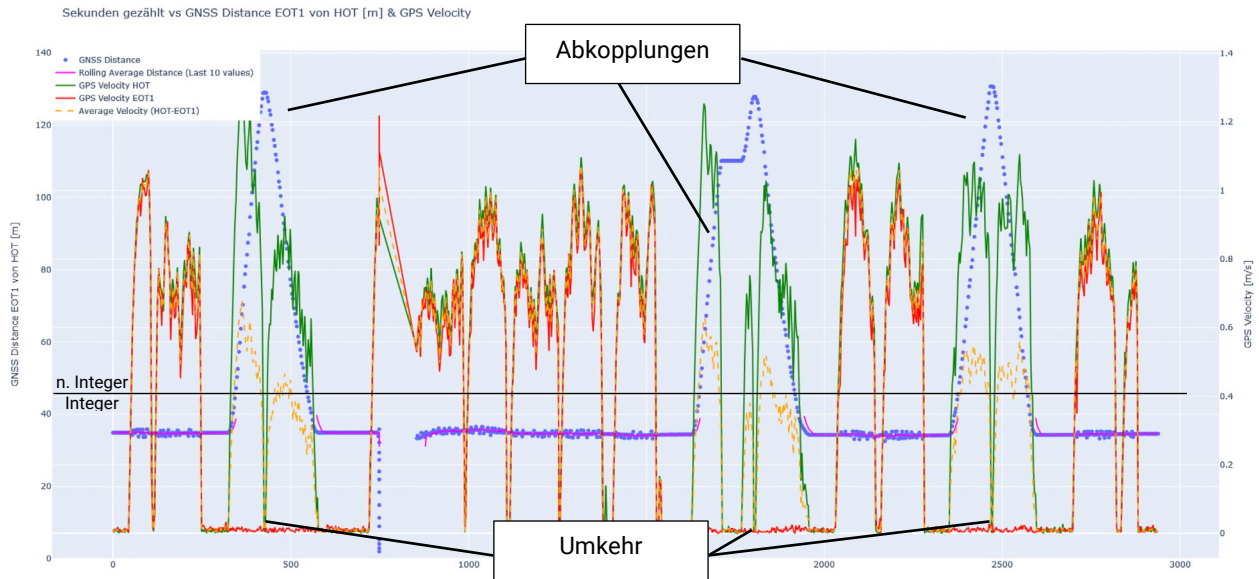


Abb. 30 Zeitabschnitt 3, DRC

Grafische Aufbereitung der Rohdaten

In diesem Abschnitt werden die GNSS Rohdaten aus den log-files der Einzelgeräte untersucht. Die Lng.- und Lat. Positionen jeder Einzelmessung aus Zeitabschnitt 1 wurden in einen GPX-Pfad umgewandelt und in eine Open-Street-Map Karte eingetragen. Somit ist eine zeitunabhängige Betrachtung möglich und der Einfluss der fehlenden Synchronisation nicht mehr vorhanden. Durch Beobachtung und Videomitschnitte ist bekannt, dass die Fahrzeuge sich als Verband fortbewegt haben. Die maximale Abweichung der horizontalen GNSS-Genauigkeit lag bei 3,3 cm, die vertikale bei 5,6 cm. In der Abb. 31 ist der seitliche Abstand beider Geräte zu erkennen. Der parallele Versatz ist mit der Aufhängung der Geräte an den Fahrzeugen zu erklären. Der EOT wurde etwas weiter Richtung Fahrzeug-Mitte befestigt. Mit dieser Analyse lässt sich die Leistungsfähigkeit der DGNSS Messtechnik für das TIMS sehr gut bewerten. Die hier gezeigten Messungen fanden alle bei klarem Sonnenschein und bei freier Sicht des Demonstrators statt. Vor dem Messbeginn wurden ca. 2 min vorab die Geräte gestartet, um so viele Satelliten wie möglich für die Berechnung der Position nutzen zu können.

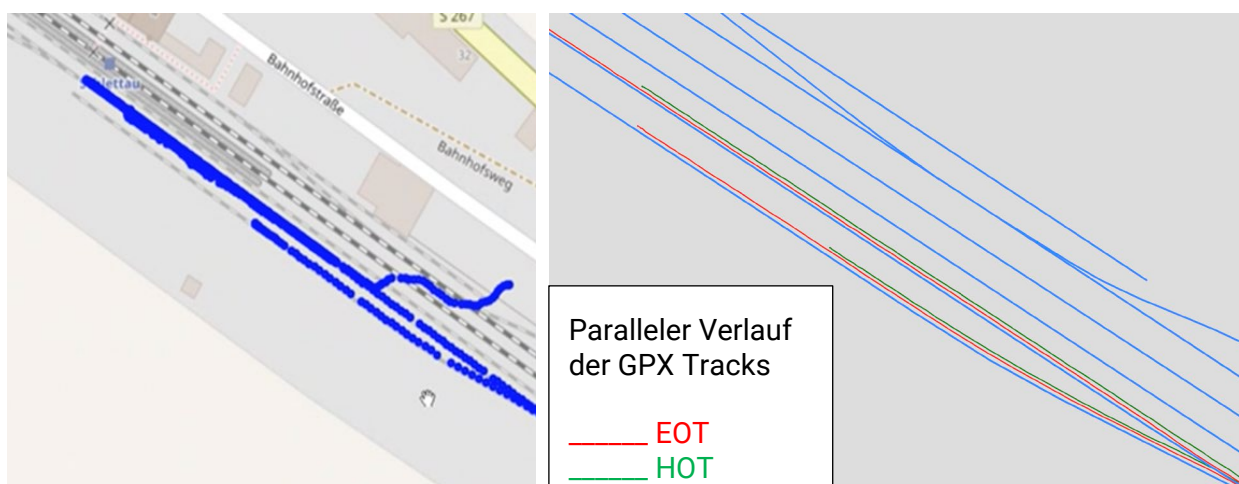


Abb. 31 Einzelmesspunkte, DRC

2.6.2 Auswertung Messfahrt Dezember 2023

Der Aufbau zu den Messfahrten im Dezember 2023 ist im Kapitel 2.5 näher beschrieben. Die Integrationsfeststellung für alle Messungen im folgenden Abschnitt, wird mittels GNSS-Messsystem vorgenommen.

Die LoRa-RSSI Längenbestimmung wird ebenfalls ausgewertet. Um einen reibungslosen Ablauf zu gewährleisten und so wenig Messausfälle wie möglich zu haben, wurde die Kommunikation ausschließlich über die LTE/5G-Schnittstelle ausgeführt. Für die Auswertung wurde sowohl das Gesamt-log-file aus dem HOT-Knoten analysiert als auch die Einzellogfiles der EOT's. Insgesamt entstanden über 240 log-files, welche mit Hilfe von Excel und Mat-Lab ausgewertet worden. Es wird nur auf die wesentlichsten Punkte eingegangen.

GNSS - Positionsbestimmung und Genauigkeit

Die Genauigkeit der einzelnen Positionen lassen sich mit einer Wahrscheinlichkeit von mind. 95 % bestimmen (Ublox). Näher wird in dieser Arbeit aber nicht auf diesen Sachverhalt eingegangen und die ausgegebenen Werte aus dem GNSS-Receiver zur Analyse herangezogen. Dabei wird sich auf die horizontale Genauigkeit (PACC H), für die Gleisortung in der Ebene beschränkt. Alle Genauigkeiten $\geq 10\text{m}$ werden nicht betrachtet, da diese sehr wahrscheinlich von einer Fehlfunktion durch hohen workload oder Neustart der Geräte hervorgerufen werden. Alle Zeilen mit fehlenden Daten aus den log-files, aus gleichem Grund, wurden gelöscht.

Fahrtabschnitt	Ø Geschwindigkeit [km/h]	Ø PACC H [m], HOT	Ø berechnete Länge HOT - EOT 2 [m]
Hinfahrt	21	0,266	15,6
Rangierfahrt 1	4	0,132	12,89
Rangierfahrt 2	10	0,110	17,83
Rangierfahrt 3	20	0,198	15,77
Rangierfahrt 4	30	0,196	21,44
Rangierfahrt 5	40	0,480	17,7
Rückfahrt	15	0,258	22,13

Tabelle 7 GNSS Genauigkeit und Länge in den Fahrtabschnitten



Abb. 32 Ausschnitt GNSS-Genauigkeit aller devices

In der Tabelle 7 ist die berechnete Länge von HOT – EOT 2 und die HOT horizontale Genauigkeit (PACC H) des HOT für alle Messabschnitte mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten dargestellt. In der Abb. 32 lässt sich der Bezug der Position zum Gleis (OpenStreetMap) und Abweichung sehen. Es lässt sich eindeutig erkennen, dass EOT 1 eine höhere Abweichung, aufgrund der Anbringung im Innenraum des Fahrzeuges hat. Die Auswertung aller Messdaten zeigt hier ein klares Ergebnis von durchschnittlich 1,31 m, was immer noch ein sehr guter Durchschnittswert ist. Der Durchschnitt aller Messungen für den HOT liegt bei 0,23 m. Die Abhängigkeit der PACC H zur Geschwindigkeit kann abgeleitet werden. So sinkt diese bei

höherer Geschwindigkeit und steigt bei geringen Geschwindigkeiten. Im Stand ist sie am höchsten. Leider ließ sich aufgrund der Streckenbegrenzung keine Geschwindigkeit über 50 km/h realisieren.

Eine fehlende Zeitsynchronisation lässt eine genaue und vor allem reale Längenberechnung nicht zu (siehe Tabelle). Die Hintergründe und das resultierende Verhalten wurden im Abschnitt 2.6.1 erläutert. Es macht den Anschein, dass die Längenberechnung über GNSS sehr ungenau ist, obwohl eine sehr genaue Positionsbestimmung der einzelnen devices vorhanden ist. Zur Prüfung wurden auch in diesem Abschnitt wieder die Einzelmesspunkte aller Messungen nachträglich auf eine Karte eingetragen. In Abb. 33 ist eine Aufzeichnung der Messpunkte in eine OSM Karte zu sehen. EOT 2 und HOT liegen hier sehr genau auf einem Gleis im Bhf. Schlettau. EOT 1 (im Zug) liegt in diesem Fall ca. ½ Gleisabstand daneben. Bei einer Animation der Einzelmesspunkte bewegen sich die Einzelmesspunkte offensichtlich mit gleichem Abstand und exakt parallel zueinander in die Fahrtrichtung des Zuges. Die Unregelmäßigkeiten im linken, oberen Bildbereich sind mit einem Neustart der Geräte zu erklären. Man sieht, wie sich die gemessene auf die tatsächliche Position einschwingt.



Abb. 33 Einzelmesspunkte Rangierfahrt

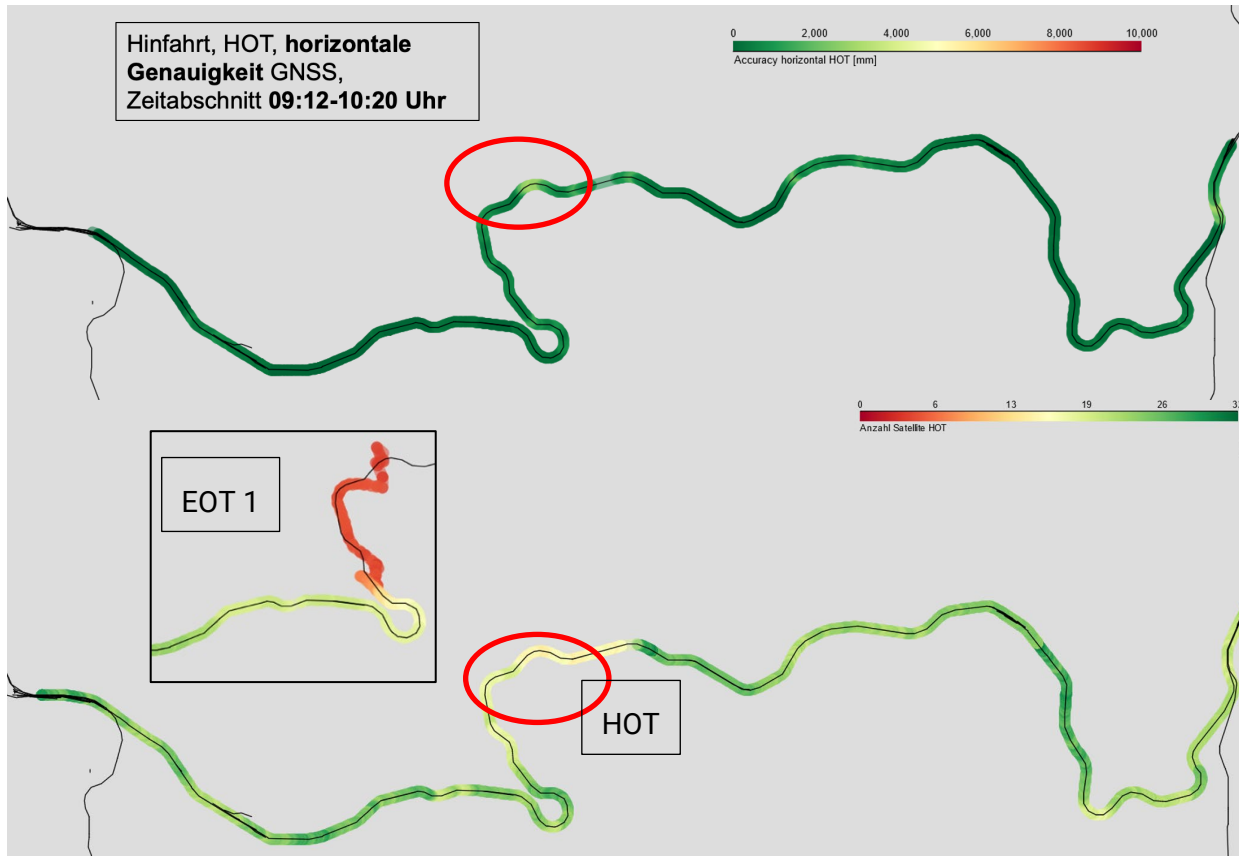


Abb. 34 Zusammenhang der Genauigkeit (oben) und Satellitensichtbarkeit (unten)

Da die Genauigkeit der Positionsbestimmung nicht nur von der Geschwindigkeit, sondern auch mit der Anzahl der genutzten Satelliten (alle Systeme) zusammenhängt, ist in der Abb. 34 zu erkennen. In dem markierten Bereich, sinkt die Anzahl bis auf 15 Satelliten, wobei es im Mittel 27,5 sind. Hier steigt der Wert der Genauigkeit auf 3,4 m. Im gleichen Bereich gab es auch eine kurzzeitige Störung der Mobilfunkverbindung (siehe Mobilfunkverbindung LTE/5G- RSSI und SINR) in der kurzzeitig keine Korrektur über den SAPOS Dienst erfolgte. Im EOT 1 (im Zug) waren im gleichen Zeitabschnitt min. nur 6 Satelliten sichtbar und auch kurzzeitig keine SAPOS Unterstützung möglich.

Mobilfunkverbindung LTE/5G- RSSI und SINR

Alle Geräte des Demonstrators loggen intern die Empfangsfeldstärke (RSSI) und das Signal-Interferenz-Rausch-Verhältnis (SINR) für die öffentliche LTE-Mobilfunkverbindung mit Vodafone als Provider. Die beiden Werte werden von den EOT-Geräten zusätzlich per Mobilfunk zum HOT gesendet und in dem übergeordneten Log-file aufgezeichnet. Eine parallele Auswertung dieser Daten lässt Aussagen über die Zuverlässigkeit der Verbindung in den gemessenen Zeitabschnitten zu. Eine Referenzmessung mit einem industriellen, mobilen Netzwerkscanner wurde zusätzlich durchgeführt und so die Messergebnisse validiert.

Die befahrene Strecke zwischen Schwarzenberg und Annaberg-Buchholz Süd hat eine sehr gute Mobilfunkabdeckung, gerade im 5G-Standard. Die Konfiguration der Geräte am Messtag lies lediglich eine Verbindung zu den LTE-Signalen zu. Auch konnte leider kein Bezug zu den Signalen der einzelnen Basisstation (PCI, Frequenzband) hergestellt werden.

In den Abb. 35 und Abb. 36 werden die RSSI und SINR nur für den HOT gezeigt. Die Darstellung vereint alle an dem Tag aufgenommenen Werte mit dem jeweiligen Positionsbezug aus den GNSS Werten des HOT. Die Überlagerung der Daten bei mehrmaliger Überfahrt der gleichen Pos. ist hierin nicht zu erkennen. Mit durchschnittlich -62 dBm liegt der RSSI Wert in einem sehr guten Bereich. Es konnte zu keiner Zeit ein Verbindungsabbruch zu den Basisstationen festgestellt werden.

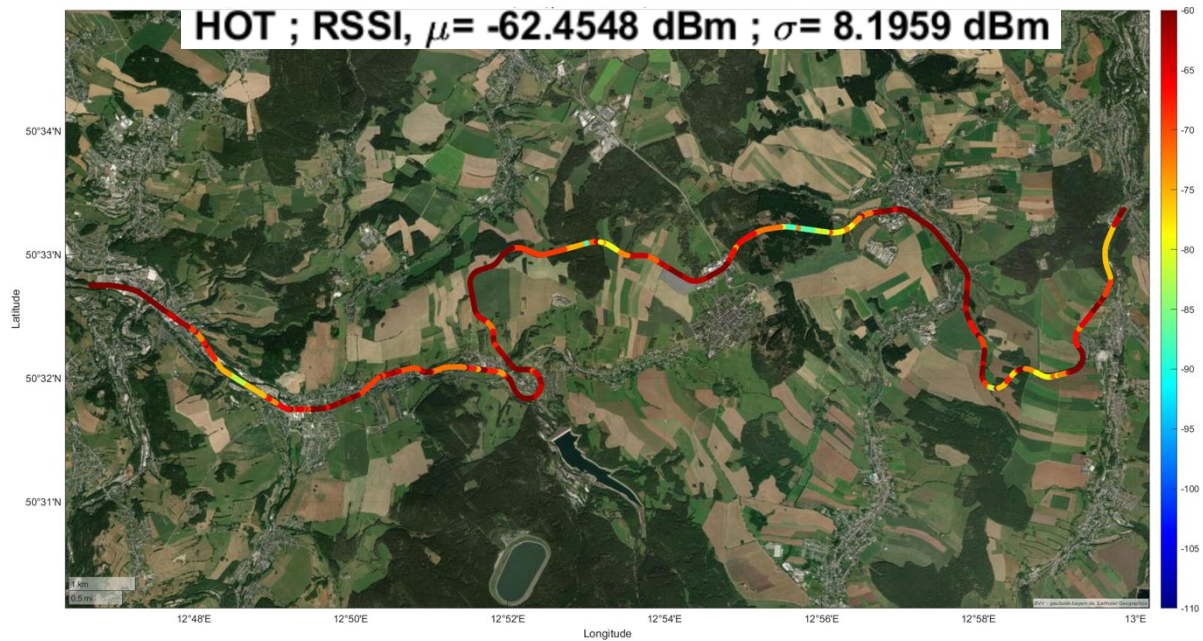


Abb. 35 Empfangsfeldstärke – HOT

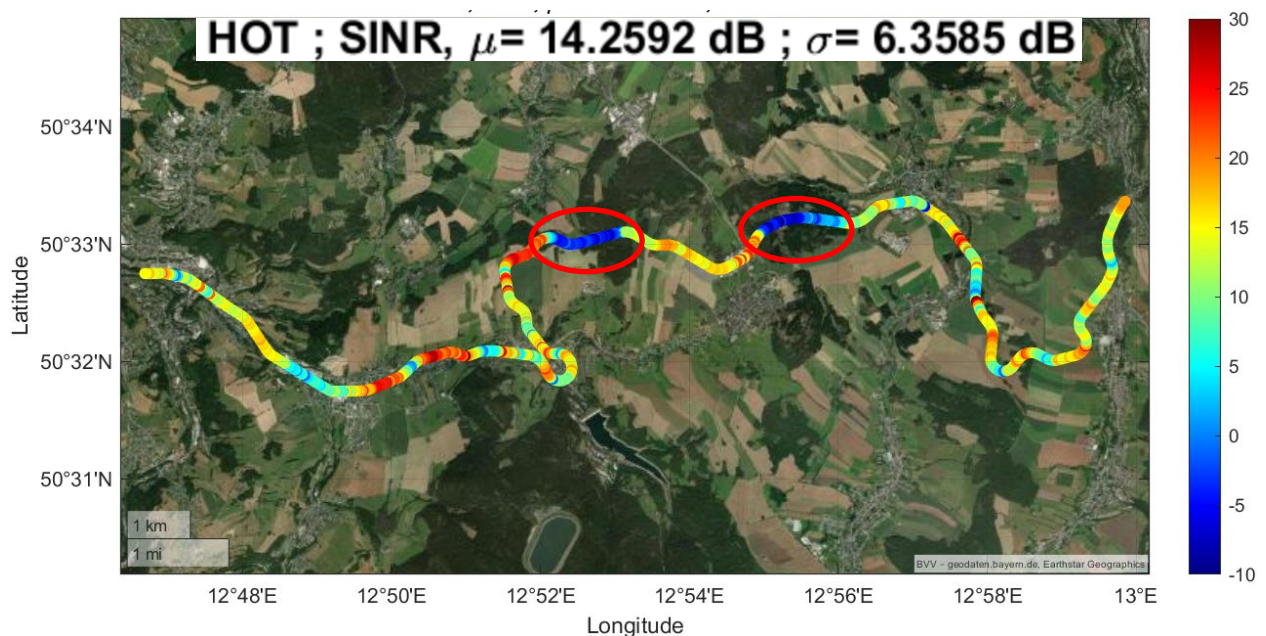


Abb. 36 Signal-Interferenz-Rausch-Verhältnis – HOT

Anders sieht es bei Betrachtung des SINR aus. Dieser Wert kann als qualitative Einschätzung der Mobilfunkverbindung genutzt werden. Er setzt dabei die Leistung des genutzten Signals ins Verhältnis zur Summe der Störsignale + Hintergrundrauschen. Dabei sind Werte oberhalb von 10 dB als ein sehr gutes Signal zu interpretieren. Werte unterhalb von 0 dB führen zur Einschränkung der Datenrate bis hin zum Verbindungsabbruch zwischen den Geräten. In den beiden Markierungen in der Abb. 36 sind die Bereiche gezeigt, bei denen teilweise keine Verbindung zwischen den Geräten möglich war. Im log-file ist demnach kein Wert (gilt für alle Parameter) aus den beiden EOT's eingetragen. Eine Längenberechnung zu diesen Zeitpunkten über die GNSS Werte ist dann nicht mehr möglich – folglich erscheint die Meldung → „Train Integrity invalid“.

Für 2,63 % aller Messreihen konnten keine Werte über die Mobilfunkverbindung übertragen werden, die auf eine qualitativ schlechte Verbindung dieser zurückzuführen ist. Die maximale Zeitdauer für einen zusammenhängenden Datenverlust, liegt bei 38 sec. Der Zug hat sich in dieser Zeit über eine Strecke von 465,5 m, mit einer Geschwindigkeit von $\varnothing$ 12,3 m/s weiterbewegt. Übertragungsverluste aufgrund von Systemausfall des Demonstrators wurden nicht mit einbezogen. Eindeutig ist der Bezug von Verbindungsabbruch zu den schlechten SINR Werten. Die Ursache konnte hier nicht weiter untersucht werden. Es ist aber denkbar, dass z. B. die hohe Dichte der Basisstationen in den bewaldeten Bereichen aufgrund der Forschungsinfrastruktur zu Interferenzen des Nutzsignals führen. Die Referenzmessung mit dem Netzwerkschanner lieferten sehr ähnliche Ergebnisse, auch hier waren Verbindungsabbrüche an den markierten Stellen zu verzeichnen.

LoRa-RSSI Längenmessung

Die Kalibrierung auf die Länge von 13 m wurde zum Fahrtantritt am Bahnhof Schwarzenberg bei freier Umgebung durchgeführt und bis zum Ende aller Messungen nicht wiederholt. Diese Vorgehensweise könnte die einer bahnbetrieblichen ähnlich sein. Auch hier würde die Kalibrierung nach dem Rangieren und vor dem Fahrtantritt stattfinden und bis zur Beendigung der Fahrt oder erneutem Rangieren nicht mehr geändert.

Fahrtabschnitt	$\varnothing$ Geschwindigkeit [km/h]	$\varnothing$ berechnete Länge HOT - EOT 2 [m]	minimale Länge [m]	maximale Länge [m]	Standardab- weichung σ [m]	Verbin- dungs- verlust
Hinfahrt	21	11,51	4,61	15,45	1,3	0%
Rangierfahrt 1	4	12,34	10,93	14,58	0,9	0%
Rangierfahrt 2	10	12,16	10,93	18,36	1,0	0%
Rangierfahrt 3	20	10,6	9,75	10,93	0,8	0%
Rangierfahrt 4	30	10,21	8,69	10,33	0,7	0%
Rangierfahrt 5	40	12,0	9,74	14,58	0,9	0%
Rückfahrt	15	13,54	8,2	27,48	-	0%

Tabelle 8 LoRa-RSSI Längenberechnung zu EOT 2 in den Fahrtabschnitten

In der Tabelle 8 sind die durchschnittlich berechneten Werte für die RSSI-Längenmessung in den jeweiligen Fahrtabschnitten abgebildet. Es wird hier nur auf die Verbindung der Geräte außerhalb des Fahrzeuges eingegangen. Im Mittel aller Messungen, liegt der berechnete Wert 1,2m (9,3%) unterhalb der kalibrierten Länge von 13 m. Die Streuung hingegen ist recht hoch. Der maximale Wert der Berechnung liegt bei über 210 % Abweichung zum kalibrierten Wert.

Die Fehler sind im Vergleich GNSS Berechnungsfehler real und unterliegen keinem systematischen Fehler durch fehlende Zeitsynchronisation. Durch die sich stark wechselnde Umgebung bei z. T. stark verschneiten Bedingungen ändern sich die Ausbreitungsverluste der LoRa-RSSI Verbindung bei der Fahrt ständig und sind stark von Brechung, Reflektion und Interferenz beeinflusst. Der maximale Wert von 27,48 m bei der Rückfahrt, ist auf die simulierte Fahrzeugtrennung im Wald zurückzuführen. Wenn eine Integrationsbestimmung mit einer Längentoleranz von 10 m über LoRa-RSSI stattgefunden hätte, ist davon auszugehen, dass diese sicher erkannt worden wäre. Der Bereich der Zugtrennung ist in der Abb. 37 rot eingekreist.

Die Änderungen der Empfangsfeldstärke im Fahrtverlauf ist gut in der Abb. 37 Empfangsfeldstärke LoRa-RSSI – Hin- und Rückfahrt zu erkennen. Auffällig ist, dass die Hinfahrt (oben) z. T. stark andere Werte im Vergleich zur Rückfahrt (unten) liefert. Die Gründe hierfür konnten nicht gefunden werden. Es ist möglich, dass der physische Gerätetausch (Annaberg-Buchholz Süd) einen großen Einfluss hat. Genauere ortsabhängige Untersuchung zu dieser Thematik konnten hier nicht gemacht werden und würden weitere Messungen mit sich ziehen.



Abb. 37 Empfangsfeldstärke LoRa-RSSI – Hin-und Rückfahrt

Zu jeder Zeit der Messungen konnte eine LoRa-RSSI Verbindung erreicht werden, ausgenommen sind Gerätefehler durch workload etc. Keiner der anderen Verbindungen konnte eine solche hohe Zuverlässigkeit erreichen, wenngleich zu bemerken ist, dass hier nur eine kurze Distanz gemessen wurde.

3 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Das Projekt wurde an der TU Chemnitz durch die Professur Mess- und Sensortechnik sowie die Professur Nachrichtentechnik durchgeführt. Die im Rahmen des Projektes entstandenen Ausgaben betrugen insgesamt 228.928,41 € (zzgl. Projektpauschale i. H. v. 45.785,68 €). Sie liegen damit 8.929,77 € (ohne Projektpauschale) unter der bewilligten Zuwendung. Die Ausgaben wurden im Wesentlichen für Personalausgaben zur Beschäftigung wissenschaftlicher Mitarbeiter (121.029,55 €), für die Vergabe von Aufträgen (107.776,13 €) sowie Dienstreisen (122,73 €) verwendet.

Die Personalausgaben zur Beschäftigung wissenschaftlicher Mitarbeiter sind geringfügig höher ausgefallen als ursprünglich vorgesehen (Pos. 0812: Verausgabung i. H. v. 121.029,55 € statt der geplanten 117.246,18 €). Gleichzeitig konnten insbesondere hinsichtlich der Durchführung von Testfahrten bei der Vergabe von Aufträgen einige Mittel eingespart werden (Pos. 0835: insgesamt Verausgabung i. H. v. 107.776,13 € statt der ursprünglich geplanten 117.000,00 €).

Wegen der COVID-19 Pandemie und der damit eingeschränkten Mobilität konnten keine Dienstreisen in den ersten Monaten der Projektlaufzeit unternommen werden, weshalb ein großer Teil der dafür geplanten Mittel (Pos. 0846: Verausgabung i. H. v. 122,73 € statt der geplanten 3.612,00 €) ungenutzt blieb. Durch die sich ergebenden digitalen Möglichkeiten zum Austausch konnten hier generell Mittel eingespart werden. Dennoch wurden Konferenzen besucht, bei denen auch Projektergebnisse vorgestellt wurden, so die Digital Rail Convention 2023 (Annaberg-Buchholz).

Für das Projekt wurden kostenneutrale Laufzeitverlängerungen beantragt und bewilligt, die im Wesentlichen auf Verzögerungen in der Projektbearbeitung aufgrund der Auswirkungen der COVID-19 Pandemie sowie anhaltender Lieferschwierigkeiten für elektronische Komponenten zurückzuführen sind.

4 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Die durchgeführten Forschungsarbeiten im Projekt „TIMS“ und die dafür aufgewendeten Ressourcen waren notwendig und angemessen, da sie der Planung laut Projektantrag entsprachen und alle im Arbeitsplan formulierten Aufgaben erfolgreich bearbeitet wurden. Es waren trotz Verlängerung der Projektlaufzeit keine zusätzlichen Ressourcen für das Projekt notwendig.

5 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Voraussichtlicher Nutzen:

Die Untersuchung der Machbarkeit einer fahrzeugseitigen Zugintegritätsüberwachung ermöglichte den Projektpartnern anhand eines Demonstrators den Nachweis der Funktionsfähigkeit der erarbeiteten Prinziplösung eines TIMS aufzuzeigen.

Die umfangreich gewonnenen Erfahrung im Umgang mit den TIMS-Geräten und der Messtechnik für diverse Voruntersuchungen können für weitere SRCC-Projekte genutzt werden. Im speziellen kann die Vielzahl der einzelnen Technologien, die die TIMS-Demonstratoren zur Verfügung stellen, für weitere Kommunikations- und Konnektivitätsanwendungen am Campus eingesetzt werden. Die gewonnenen Ergebnisse sind bereits jetzt, in Teilen in die Lehre am Lehrstuhl Nachrichtentechnik, an der TU Chemnitz eingebunden. Des Weiteren sind studentische Hilfskräfte geplant, um die TIMS-Demonstratoren zu verbessern und die einzelnen Technologien mit verschiedenen Settings (z. B. SIM-Karten) zu untersuchen. Durch die flexible, mobile Verwendung der Hardware sind Langzeitmessungen bei betrieblichen Fahrten zwischen Annaberg-Buchholz und Chemnitz am zukünftigen Forschungszug der TU Chemnitz möglich. Eine große Menge an statistischen Daten können so mit den Demonstratoren erzeugt werden und bilden eine wichtige Grundlage zur Einschätzung der Qualität des ausgebauten Forschungsnetzes und zur Verwendung der Technologien und deren Applikationen für den bahnbetrieblichen Alltag.

Verwertbarkeit

Durch die erfolgreiche Durchführung des dargestellten Projekts kann im nächsten Schritt durch die Antragsteller ein Prototyp entwickelt werden, der nach Genehmigung durch das Eisenbahn-Bundesamt durch die Beteiligten (IB Weißflog) oder ein eigens dafür in der WIR!-Region zu gründendes Unternehmen vertrieben werden kann.

Neben den wirtschaftlichen Erfolgsaussichten bestehen auch wirtschaftliche Risiken bei der

- Planung und Montage,
- Genehmigung für Versuchsfahrten mit nicht zugelassenen Komponenten,
- Investitionen in Umrüstungen von Fahrzeugen und zu beschaffende Versuchskomponenten sowie
- Gesamtpreis und Vermarktbarkeit des Gesamtsystems.

Um im Anschluss an das Projekt ein anwendungsfähiges Produkt entstehen zu lassen, muss für die zu erarbeitende Vorzugsvariante eine Genehmigung zum Inverkehrbringen und Verwenden (GuV) erlangt werden. Dazu ist für die technische Lösung ein Sicherheitsnachweis gemäß den EN 50126, EN 50128 und EN 50129 zu erstellen. Das Problem der Zugintegritätsüberwachung besteht mit Ausnahme des russischen Breitspurnetzes bei allen Bahnen Europas. Nach Vorliegen jeweiliger Nachweise und Genehmigungen eines Prototypens ist eine europaweite Anwendung denkbar. Die Herstellung, der Vertrieb und/oder die Lizenzvergabe durch ein Unternehmen in der WIR!-Region wäre dann denkbar.

Weitere Transferansätze:

- Integration der entwickelten Technik für das EoT in eine Art „elektronische Zugschlussscheibe“; Anbringung dieser Scheibe an den jeweils letzten Wagen des Zuges an der bisherigen, genormten Stelle für das Zugschlusssignal (Güterwagen), Patentanfrage läuft.

6 Verwertungsaktivitäten und Veröffentlichungen

Wissenschaftliche Ergebnisverwertung

Das Projekt stellt mehrere Herausforderungen, die wissenschaftlich weiterverwertet werden. Zum einen wirken Güterwagen durch ihr Material abschirmend. Eine standardmäßige Knoten-zu-Basis Kommunikation wird dadurch verhindert. Die vergleichsweise einfache Laufzeitmessung bzw. Signalstärkemessung zur Zugintegrität ist so nicht möglich. Die Lösungsfindung wird hier neue Erkenntnisse liefern ob, wie und mit welcher Antennenkonstruktion sich dies beheben lässt.

Veröffentlichungen:

- Eine Veröffentlichung des Projektes erfolgte bei der DRC vor einem Fachpublikum. Die dort stattgefundenen Versuchsfahrten wurden bereits in der Fachzeitschrift „DER EISENBAHNINGENIEUR“ 11/2023 als Kurzmitteilung veröffentlicht
- bereits veröffentlicht:
 - An Experimental Comparison of LoRa versus NB-IoT over Unlicensed Spectrum using Software Defined Radio; 10.1109/EuCNC/6GSummit58263.2023.10188278
 - Improving the Reliability of Long-Range Communication against Interference for Non-Line-of-Sight Conditions in Industrial Internet of Things Applications;
<https://doi.org/10.3390/app14020868>
- Eine weitere Veröffentlichung der Projektergebnisse ist in der Zeitschrift SIGNAL + DRAHT für den Zeitraum Oktober 2024 geplant.

Abkürzungsverzeichnis

ACC	Acceleration
ATO	Automatic Train Operation
DGSS	Differential GNSS
DRC	Digital Rail Convention
EOT	End Of Train
EVC	European Vital Computer
GNSS	Global Navigation Satellite Systems
GPX	GPS Exchange Format
HEPS	Hochpräziser Echtzeit-Positionierungs-Service
HOT	Head Of Train
IOT	Internet Of Things
Lat.	Latitude
Lng.	Longitude
LoRa	Long Range
LoRa comm	Long Range Kommunikationsmodul
LoRaWAN	Long Range Wide Area Network
LOS	Line Of Sight (Sichtverbindung)
NLOS	Non Line Of Sight (keine Sichtverbindung)
P2P	Peer-to-Peer (Direktverbindung)
PACC H	horizontale Genauigkeit für GNSS
PCI	Physical Cell ID
RAMS	reliability, availability, maintainability and safety
RTK	Real Time Kinematik
SAPOS	Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Landesvermessung
SF	Spreading Factor
SINR	Signal to Interference plus Noise Ratio
SSH	Secure Shell Protocol
Tf	Triebfahrzeugführer
TIMS	Train Integrity Monitoring System
TLR	Technology Readiness Level
TSI	Technische Spezifikation für die Interoperabilität
UE	User Equipment