

Sachbericht zum Verwendungsnachweis

Teil I – Kurzbericht

WIR!-Projekt: „Train Integrity Monitoring System“ (FKZ.: 03WIR1206B)

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.

Projektziele:

- Entwicklung eines alltagsfähigen und bahntauglichen Verfahrens zur Überwachung der Zugintegrität mit Berücksichtigung der besonderen Verhältnisse im Eisenbahngüterverkehr auf Basis eines funktionalen Ansatzes
- Praktische Erprobung eines Demonstrators auf Basis bereits untersuchter Methoden zur Überwachung der Zugintegrität
- Feststellung der Machbarkeit und betriebliche Eignung auf der Strecke Annaberg-Buchholz-Schwarzenberg (Erzgebirge) - u. a. Erprobung betrieblicher Sonderfälle

Ergebnisse:

- Demonstrator zum Nachweis der Machbarkeit der Feststellung und Überwachung der Zugintegrität im Güterverkehr
- Forschung und Entwicklung durch regionale Unternehmen

Ziel des Forschungsvorhabens war die praktische Erprobung einer oder mehrerer Lösungen zur Überwachung der Zugintegrität sowie die betriebliche Integration im SRCC. Dabei sollten die Machbarkeit/Realisierbarkeit der technischen Lösungen sowie die betriebliche Eignung in der Erprobungsumgebung sowie die Übertragbarkeit zur Anwendung im Bahnbereich innerhalb Deutschlands untersucht werden. Daraus resultierend sollte systematisch Betriebserfahrung aufgebaut werden, um aus diesen Erfahrungen ggf. Anforderungen für künftige Systeme zur Überwachung der Zugintegrität ableiten zu können. In diesem Zusammenhang sind auch die Kompatibilität zu künftigen Zugsicherungssystemen wie z. B. ETCS Level 3 bzw. Level 2 mit TIMS nach TSI CCS 2023, zu untersuchen und ggf. Anforderungen zur Erfüllung der Kompatibilität abzuleiten.

Ein weiterer Schwerpunkt ist die Frage nach der Integration der technischen Lösung in die Gesamtstruktur von EVU und EIU und damit verbunden die Definition der benötigten Schnittstellen. In diesem Zusammenhang ist auch die Klärung der rechtlichen Folgen für EVU und EIU und evtl. die Festlegung „neuer Regeln“ erforderlich. Das Vorhaben war als Befähigerprojekt für die Initiierung weiterer Forschungsprojekte im Rahmen des Gesamtvorhabens SRCC verankert. Es stellte damit ein grundlegendes Element für die Umsetzung der im WIR!-Konzept formulierten SRCC-Strategie dar, um den Forschungscampus über die Förderperiode hinaus nachhaltig aufzustellen. Weiterhin schuf das Vorhaben die Basis für viele Forschungs- und Entwicklungs- sowie Innovationsaktivitäten des gesamten SRCC-Projektes, die sicherheitskritische Innovationen zum Ziel haben. Mit diesen Aktivitäten wurden die F&E-Kompetenzen und -kapazitäten insbesondere auch der Unternehmen in der Region gestärkt. Zudem sollte über die bessere Ausnutzung vorhandener Wertschöpfungspotenziale durch neue Technologien, Produkte, Services und Geschäftsmodelle ein wesentlicher Beitrag für einen regionalen Strukturwandel in der Region Chemnitz-Erzgebirge geleistet werden.

Als Projekt mit einem sehr komplexen Thema, das eine interdisziplinäre Bearbeitung durch verschiedene Partner unter Einbeziehung weiterer externer Experten erforderte, diente das Vorhaben einer erstmaligen fachlichen Zusammenarbeit wichtiger Kooperationspartner unter dem

neuen Dach des SRCC und damit auch der Erschließung bzw. Weiterentwicklung von Transferpotenzialen zwischen ihnen.

Projektpartner hierbei waren:

- TU Chemnitz: Professur Mess-/Sensortechnik sowie Professur Nachrichtentechnik
- CERSS Kompetenzzentrum Bahnsicherungstechnik GmbH
- Smart Rail Connectivity Campus e. V.

2 Ablauf des Vorhabens

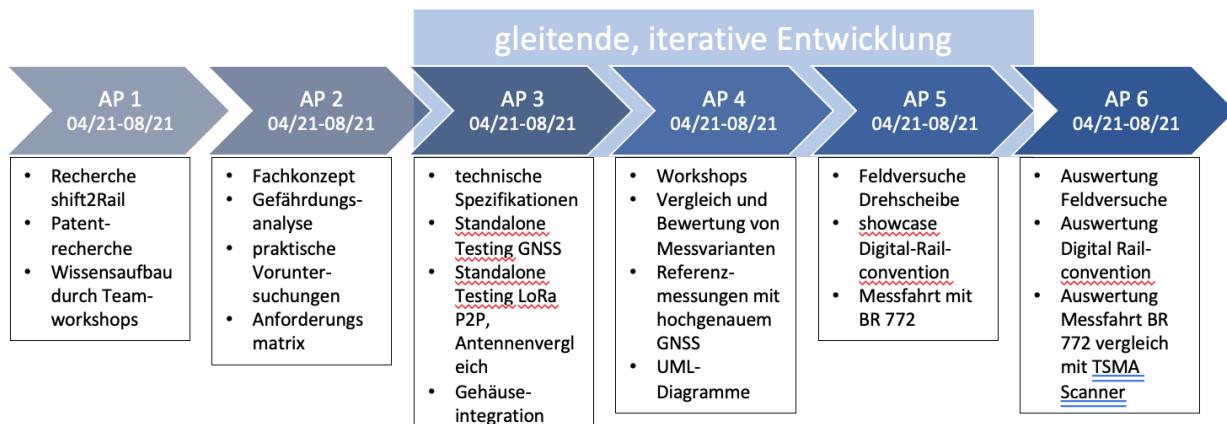


Abbildung 1: Projektablauf

Um den Demonstrator für das Zugintegritätsüberwachungssystem (TIMS) spezifizieren zu können, wurden vorab umfangreiche Recherchen zu den Rahmenbedingungen und dem aktuellen Stand der Technik durchgeführt:

- Überblick über die bisherigen Forschungsergebnisse aus dem europäischen Forschungsprogramm Shift2Rail (Projekt-Bereich ETALON
https://projects.shift2rail.org/s2r_ip2_n.aspx?p=s2r_ETALON)
- Sammlung von Anforderungen an TIMS, die in Shift2Rail definiert wurden
- Erarbeitung einer Übersicht über international verwendete EoT-Devices (EoT...End of Train; diese Geräte dienen zur Überwachung des Zugschlusses)
- Überblick über Patente im Zusammenhang mit Zugintegrität
- Analyse von Anforderungen an Zugintegritätsüberwachungssysteme (Train Integrity Monitoring Systems – TIMS) aus dem zukünftigen europäischen Zugbeeinflussungssystem ETCS heraus (Subset-026; Subset-034; ERA ERTMS 015560 etc. aus ETCS-Spezifikation Baseline 3 Release 2 der ERA – European Union Agency for Railways)
- Anforderungen der Deutschen Bahn: Kontakt aufnahme zu Kollegen der Abteilung „Digitalen Schiene Deutschland“ und Austausch zu diesen Anforderungen (z. B. Zeitverhalten für Datenaustausch) sowie möglichen Fehlerquellen

Aufbauend darauf erfolgte die funktionale Beschreibung der (Teil-)Komponenten des TIMS und deren Zusammenwirken mit Definition der eisenbahnbetrieblichen Prozesse und Rahmenbedingungen. Durch eine parallel durchgeführte Gefährdungsanalyse kamen stets neue Erkenntnisse hinzu, sodass dieses Fachkonzept in einem iterativen Prozess weiterentwickelt und angepasst wurde. Zudem wurde eine Bewertungsmatrix für mögliche technologische Ansätze erarbeitet, um technische Realisierungsmöglichkeiten für die funktionalen Anforderungen strukturiert evaluieren

zu können. Weiterhin fand die Begleitung und Koordination von Messungen der Professuren Mess-/Sensortechnik und Nachrichtentechnik zur Ermittlung der Eignung verschiedener technischer Realisierungsvarianten statt. Daran anschließend erfolgte ein Vergleich mit dem erstellten Berechnungsmodell in Matlab. Durch dieses Verfahren konnten das genannte Modell wiederum angepasst werden und die Feldversuche besser eingeschätzt werden. Mit diesen Ergebnissen und den vorab getroffenen Anforderungen sowie dem Fachkonzept aus konnte durch die Zusammenarbeit aller Projektpartner ein TIMS-Lastenheft als Systemspezifikation erstellt und im Mai 2022 an das Ingenieurbüro Weißflog übergeben werden. Im Wesentlichen enthielt das Lastenheft folgende technische Spezifikationen (Gesamtsystemübersicht siehe Abbildung 2):

- Rahmenbedingungen (Umgebungsbedingungen, Brandschutz, funktional)
- Konstruktive Abmessungen
- Spezifikationen Datenübertragung:
 - o On-Board-Funkverbindung vom End of Train (EoT) zum Head of Train (HoT) mit 169 MHz LoRa-Modulationsverfahren (CSS) 868 MHz LoRa-Modulationsverfahren (CSS)
 - o Zelluläre Verbindung mit 4G- und 5G-Modulen

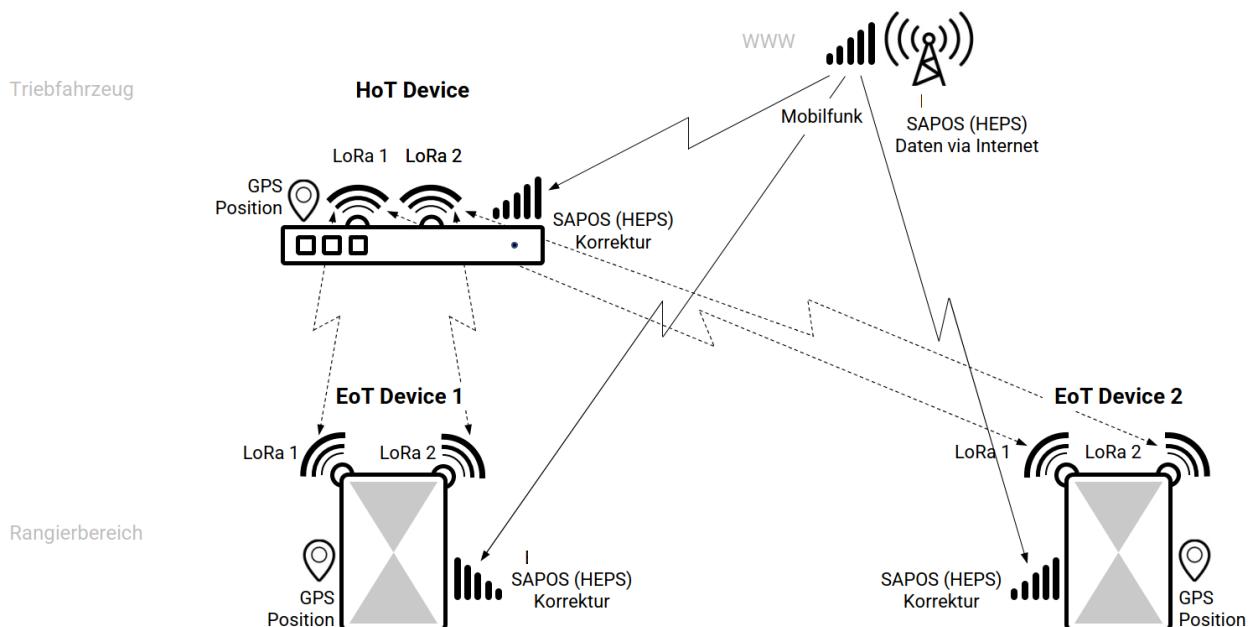


Abbildung 2: Gesamtsystem TIMS-Demonstrator

- Spezifikationen Messtechnik (Initialisierung, GNSS, RSSI):
 - o Längenermittlungssystem bestehend aus zwei Knotenpunkten: Ein Knoten befindet sich im EoT-Modul am letzten Wagen und kommuniziert mit dem HoT-Modul an der Zugspitze. Zur Messung der Zuglänge werden zwei Verfahren eingesetzt:
 1. Im Regelfall werden die Positionen von EoT und HoT mittels GNSS ermittelt. Die am EoT ermittelte Position wird zum HoT übertragen und verwendet, um Zuglänge und Zugintegrität zu ermitteln.
 2. Im Fehlerfall (GNSS nicht verfügbar) wird die Zuglänge aus den Signalstärkewerten der EoT-Signale am HoT ermittelt. Für die GNSS-basierte Ortung wird aufgrund der aktuellen Verfügbarkeit elektronischer Baugruppen GPS verwendet, für die Kommunikation zwischen EoT und HoT im Regelfall LoRa, im Fehlerfall RSSI.
 - o Die Bewertung der Leistung des GNSS soll anhand von Genauigkeit, Integrität, Kontinuität und Verfügbarkeit des Signals erfolgen.
 - o Erhöhung der Genauigkeit des GPS durch den verfügbaren Korrekturdienst SAPOS

- Systemübersicht/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 (basiert auf MTK MT3339) wurde für Anwendungen entwickelt, die über die serielle Schnittstelle mit dem Arduino verbundenes GPS verwenden, wie z. B. Zeitmessungsanwendungen oder allgemeine Anwendungen, die 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. Außerdem wird das Funkgerät SX1276 zum Empfang von Daten des EoT-Knotens und das GPS-Modul L80 zur Standortbestimmung verwendet. 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.
- Definition von Zuständen des Systems mit Übergängen und jeweiligen Bedingungen
- Definition des Rückschlusses von Messergebnissen der verschiedenen Messmethoden auf die Zugintegrität und deren Gültigkeit/Plausibilisierung

Bereits im Oktober 2022 folgte der Auftakt zum AP4, parallel zum laufenden AP3. Im Jahr 2023 wurden weiterhin innerhalb der Projektgruppe das weitere Vorgehen auf Grundlage der Recherchen, den 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 sich in Einzelschritten dem Versuchsverlauf anpassende Vorgehensweise bei der Versuchsdurchführung geeinigt werden. Die Inbetriebnahme der Hardware und der einzelnen Technologien des TIMS-Demonstrators erfolgte bereits während der Entwicklung gemeinsam beim Auftragnehmer (Ingenieurbüro Weißflog).

Vor den Messungen in der Testumgebung des Eisenbahnmuseums Schwarzenberg wurden verschiedene einfache Tests in der Umgebung des IB Weißflog (kein Eisenbahnumfeld) durch alle Projektpartner im Raum Annaberg durchgeführt, um den Demonstrator in mehreren Test-Iterationsstufen auf möglichst einfache und kostengünstige Weise grundsätzlich funktionsfähig zu machen.

Als nächster Schritt wurden statische Messungen im Eisenbahnmuseum Schwarzenberg vorgenommen. Hierbei wurde ein Waggon auf einer Drehscheibe positioniert und diente als reales Hindernis für die Wellenausbreitung. An diesem wurde ein Teil des Demonstrators als digitale Zugschluss scheibe (= EoT-Modul) angebracht. Der zweite Teil des Demonstrators, wurde schrittweise, entlang einer vorab bestimmten Route von dem Waggon entfernt. Auf dieser Route befanden sich präzise eingemessene Referenzpunkte. Damit wurde eine Einschätzung über die Leistungsfähigkeit der Nachrichtenübertragung und die Genauigkeit des Längenmesssystems des TIMS möglich. 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. Nachdem sowohl die Tests in als auch außerhalb der beschriebenen Eisenbahnumgebung erfolgreich durchgeführt waren, konnten die Projektpartner die Log-Files mit allen Messwerten aus dem Demonstrator analysieren. Damit konnte ein Verständnis für die Funktionsweise, mögliche Fehler und Verbesserungsmöglichkeiten sowie die Behebung systematischer Fehler erlangt werden. Anschließend wurden jeweils entsprechende Änderungen zur Weiterentwicklung des Demonstrators vorgenommen und somit wurde dieser iterativ verbessert.

Im September fand die Digital Rail Convention (DRC) statt, die vom SRCC ausgerichtet wurde. 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 Tests bei Rangierfahrten im Bahnhof Schlettau durchgeführt. Diese dienten zugleich der öffentlichen Projektdemonstration vor einem Fachpublikum. Bei diesen Tests erfolgten mehrfache Fahrten einer Rangierlokomotive der Baureihe 107 mit einem Güterwaggon innerhalb des Bahnhofs. Bei einigen dieser 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. Darüber wurde in der Fachpresse berichtet.

Nachdem Erkenntnisse aus diesen Tests abgeleitet wurden, wurde eine weitere 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 hin und zurück abzufahren und Messdaten aufzunehmen. Zudem wurde der Einfluss bei Variation der Geschwindigkeit sowie im Rangierbetrieb bei weiteren Rangierfahrten im Bahnhof Schlettau untersucht. Auch die dabei generierten Messdaten für die ermittelte Zuglänge durch die verschiedenen Messsysteme, die Abweichung, die Satellitensicht, die Verbindungsqualität der Devices etc. wurden in Zusammenarbeit mit dem Auftragnehmer Institut für Bahntechnik gemeinsam ausgewertet und in einer Vielzahl anschaulicher Diagramme/Grafiken dargestellt.

3 Zusammenfassung der wesentlichen Ergebnisse

Es konnten in allen Arbeitspaketen wichtige Erkenntnisse zu den Aufgabenstellungen gesammelt werden, die für die Weiterführung dieses Themas, aber auch für artverwandte Projekte genutzt werden können. Mit den im Projekt entstandenen Demonstratoren konnten als Basis für die experimentelle Arbeit eine Vielzahl von aufschlussreichen Daten gesammelt werden. Mit diesen erfolgte auch der Nachweis, dass eine Feststellung der Integrität bei Güterzügen durch die verwendeten Technologien alternativ zur konventionellen Methode grundsätzlich möglich ist. Der Integritätsverlust durch mehrfach verursachte physische Zugtrennungen (DRC) und Simulation konnte jedes Mal 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 im Dezember 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 als Grundlage zur Verringerung der Zugfolgeabstände dienen kann. In vielen weiteren untersuchten Szenarien konnte gezeigt werden, wie sich die Positioniergenauigkeit ohne die SAPOS-unterstützung oder bei Aufstellung der Geräte im Fahrzeuginnenraum verhielt. Es gab in der ganzen Messperiode hierbei keine Probleme.

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 Voruntersuchen, flossen in die Entwicklung des Demonstrators ein. Es konnten sowohl bei der DRC und den Messfahrten im Dezember 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 =

13 m; Fahrzeuglänge = 13,55 m) 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 wurde allerdings ausschließlich auf Basis der gewonnenen GNSS-Daten umgesetzt.

Die Kommunikation über die Mobilfunkverbindung funktionierte in den allermeisten Fällen problemlos. Für alle Versuche und Messungen wurden 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 Schleitau eine sehr hohe LTE- und 5G-Fähigkeit 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 wurden bei Vorversuchen ohne Probleme Messstrecken von über 1 km (Sichtverbindung) erreicht. 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.: 03WIR1206B)

Laufzeit: 02/2021 – 01/2024

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



Abkürzungsverzeichnis

- AP – Arbeitspaket
- AoA – Angle of Arrival
- DGNSS – Differential GNSS
- DRC – Digital Rail Convention
- EIU – Eisenbahninfrastrukturunternehmen
- EoT – End of Train
- ETCS – European Train Control System
- EVC – European Vital Computer
- EVU – Eisenbahnverkehrsunternehmen
- FIS – Functional Interface Specification
- FMECA – Failure Mode Effect Consequences Analysis
- GNSS – Global Navigation Satellite Systems
- GPS – Global Positioning System
- GPX – GPS Exchange Format
- HoT – Head of Train
- IoT – Internet of Things
- Lat. – Latitude
- Lng. – Longitude
- LoRaWAN – Longe Range Wide Area Network
- LOS – Line of Sight
- NLOS – Non-Line of Sight
- OCORA – Open CCS Onboard Reference Architecture
- P2P – Point to Point
- RAMS – Reliability, Availability, Maintainability, Safety
- RF – Radio Frequency
- RSRQ – Reference Signal Received Quality
- RSSI – Received Signal Strength Indicator
- SF – Spreading Factor
- SNR – Signal-Rausch-Verhältnis
- Tf – Triebfahrzeugführer
- TIMS – Train Integrity Monitoring System
- TLR – Technology Readiness Level
- ToA – Time of Arrival
- TSI – Technische Spezifikationen der Interoperabilität

UML – Unified Modelling Language

WSN – Wireless Sensor Networks

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. AP3 bis AP5 sind tlg. 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 Arbeitspakte laut Antrag:

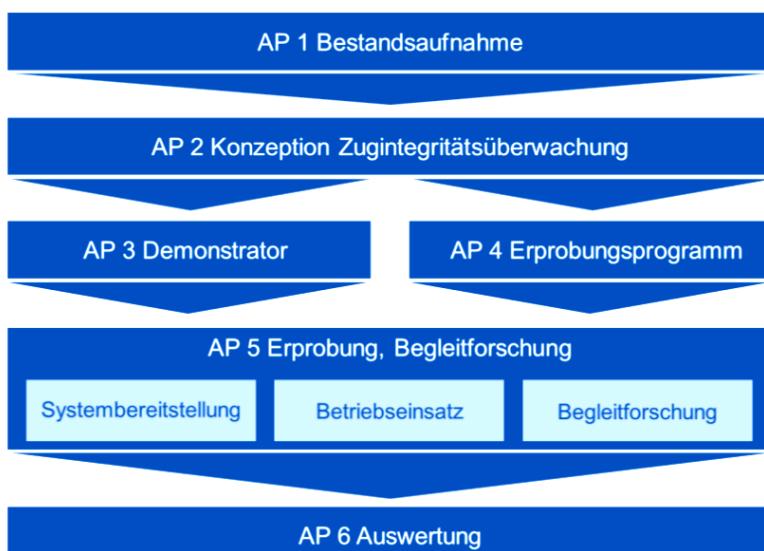


Abb. 1 Arbeitspaketstruktur laut Antrag

Durchgeführte Arbeiten anhand der Arbeitspakte und deren Zeiten:

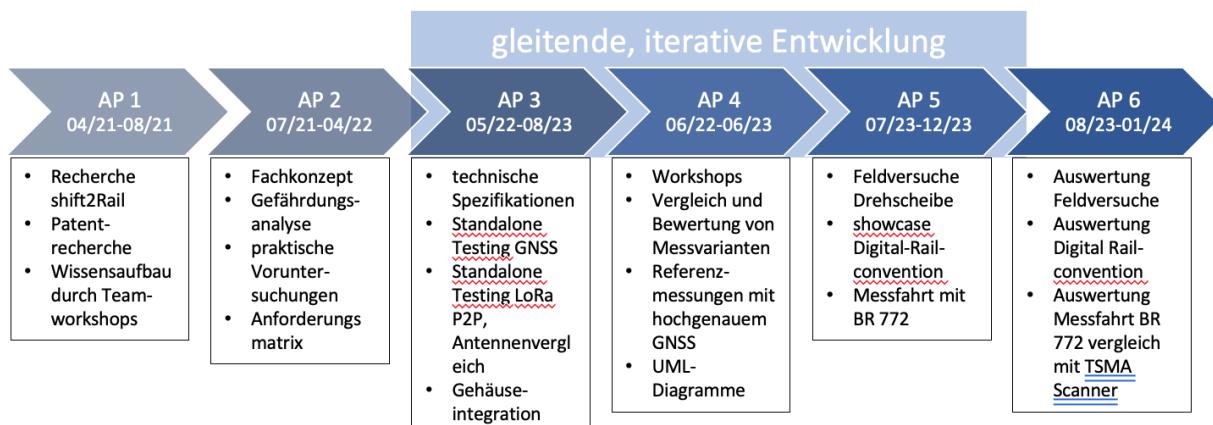


Abb. 2 zeitlicher Ablauf und durchgeführte Arbeiten

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 Sensor-knoten; 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 Stütz-akku) -> 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 (Seite 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 ER-TMS/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 Daten austausch) 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 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.

2.2.1 Funktionale Struktur und Anforderungen

Eine wichtige Aufgabe zu Beginn der Konzeptionsphase war die Festlegung der eisenbahnbetrieblichen Rahmenbedingungen für den zukünftigen Einsatz von TIMS unter Berücksichtigung der Aufgabenteilung zwischen EIU und EVU. Dazu mussten grundhafte Aufgaben und Anforderungen definiert werden.

Die wichtigsten Funktionen sind grundlegend zusammengefasst:

- Das System meldet die bestehende Integrität des Fahrzeugverbandes oder deren Verlust.
 - o Das TIMS muss messen, um die Integrität des Fahrzeugverbandes festzustellen.
 - o Das TIMS muss bewerten: Die Bewertung besteht darin, die aktuelle Länge des Verbandes mit der initialen Länge des Verbandes zu vergleichen und das Ergebnis auszugeben bzw. zu melden.
 - o Das TIMS muss über eine Schnittstelle an den EVC melden (es erfolgt kein Eingriff durch TIMS selbst).
 - o Das TIMS erbringt diese Funktionen Fahrzeugverbands-autark, das heißt, es dürfen keine infrastrukturbasierten Mess-/Referenzsysteme vorausgesetzt werden.
- Die Zugintegrität muss an den zugehörigen EVC gemeldet werden.
 - o Wenn die Zugintegrität verloren geht, so muss das unverzüglich gemeldet werden.
 - o Das TIMS muss durch den EVC zum Generieren einer Integritätsmeldung aktiviert werden können.

Hinweis: Auf diese Funktion wurde im Rahmen des Projektes verzichtet, weil die Schnittstelle zum EVC noch nicht von höherer Ebene spezifiziert wurde und dies im Projektrahmen nicht sinnvoll umsetzbar, mit Stakeholdern abzustimmen war. Gleiches gilt auch für den folgenden Punkt.

- Das SRCC-TIMS meldet den TIM-Status mit einer **Latenz**zeit von im Regelfall 3 Sekunden nach Abfrage durch den EVC. Längere Latenzeiten sind nicht sicherheitsgefährdend, wirken sich aber negativ auf die Streckenkapazität aus.
 - o Herleitung: Innerhalb von 3 Sekunden legt ein Zug bei gleichförmiger Bewegung folgende Wegstrecke zurück: 25 Meter bei 30 km/h, 50 Meter bei 60 km/h, 83 Meter bei 100 km/h, 133 Meter bei 160 km/h. Die entsprechenden Wegstrecken gelten als „besetztes Gleis“. Demzufolge: Je länger die Mess-, Berechnungs- und Kommunikationszeiten innerhalb des TIMS und zwischen TIMS und ETCS sind, desto länger ist das durch den Zugverband besetzte Gleis. Dieser Effekt verstärkt sich, je schneller der Zugverband ist.
- Das SRCC-TIMS meldet den TIM-Status mit einer Frequenz von im Regelfall einer Meldung aller 10 Sekunden.
 - o Hintergrund: Die Freimeldung des zurückliegenden Streckenabschnittes erstreckt sich vom Ort der Messung des aktuellen TIM-Status' zurück zum Ort, an dem der letzte erfolgreiche TIM-Status generiert wurde.
- Für die Ermittlung der Integrität durch das TIMS muss die initiale Länge des Fahrzeugverbandes festgestellt werden. Dies geschieht durch Zählen der Fahrzeuge bzw. Ablesen des Bremszettels und manuelle Eingabe der aktuellen Zuglänge durch den Bediener, ggf. auf Anfrage des EVC über die Bedienschnittstelle in Analogie zur Einstellung des Bremssystems vor Beginn einer Fahrt. Der Bediener muss die initiale Länge des Fahrzeugverbandes ermitteln bzw. die Zuglänge wird in der Zugbildungsanlage ermittelt und mit geeigneten Mitteln an den Tf übergeben und dem TIMS als Sollgröße zur weiteren Verarbeitung übergeben.

- Das TIMS muss Toleranzen der Verbandslänge durch Strecken und Stauchen oder die Geometrie bei Kurvenfahrt berücksichtigen. Da das längendynamische Verhalten des Fahrzeugverbandes im Einzelfall variieren kann, wird für das TIMS eine pauschale Toleranzgröße von maximal +/- 10 Metern festgelegt.
 - o Begründung, Annahme 1: Die größte anzunehmende Streckung/Stauchung könnte bei einem 750-m-Fahrzeugverband auftreten, der aus bis zu 50 Einzelfahrzeugen besteht, wobei jedes Fahrzeug mit jeweils zwei gefederten Zug-/Stoßeinrichtungen ausgerüstet sind. Jedes Federsystem kann um maximal 20 mm gestreckt werden. Rechnerisch kann ein solcher Fahrzeugverband um 2 Meter gestreckt werden.
 - o Begründung, Annahme 2: Die Gesamtlänge von normalspurigen Regelfahrzeugen beträgt in Deutschland mindestens 10 Meter.
 - o Begründung, Schlussfolgerung: Aufgrund der obigen Annahmen wird für das TIMS eine Toleranz von +/- 10 Metern von der Initiallänge gewählt. Das bedeutet: Wenn die gemessene Verbandslänge um weniger als 10 Meter von der initial eingegebenen/festgestellten und als wahr angenommenen Fahrzeugverbandslänge abweicht, gilt die Integrität als gegeben und wird so an den EVC gemeldet. Wenn die Verbandslänge um mehr als 10 Meter abnimmt, gilt die Integrität nicht mehr als gegeben. Dies wird an den EVC gemeldet.
- Das SRCC-TIMS erlaubt die Veränderung der Konfiguration des Fahrzeugverbandes, z. B. durch Stärken/Schwächen des Fahrzeugverbandes.
 - o Veränderungen der Fahrzeugkonfiguration müssen sicher in das System eingegeben werden.
 - o Es sind entsprechende betriebliche Regeln aufzustellen.
 - o Insbesondere ist beim Stärken/Schwächen des Zuges sicherzustellen, dass portable/ entlang des Fahrzeugverbandes verteilte Geräte und Einrichtungen zur Längenermittlung tatsächlich so befestigt sind, dass die gesamte Länge des Zuges gemessen wird. Hierfür sind betriebliche Regeln zu definieren.
- Sicherheitsanforderungen/nicht funktionale Anforderungen an das SRCC-TIMS, die durch eine Gefährdungsanalyse generiert wurden
 - o Keinesfalls darf der Fall eintreten, dass das SRCC-TIMS eine scheinbare Integrität des Zugverbandes feststellt, obwohl die Integrität zum Zeitpunkt der Messung tatsächlich nicht (mehr) gegeben war. Das SRCC-TIMS muss von außen (Zustand über Display/HMI einsehbar) überwachbar sein.
- Qualitäts-/Performanzanforderungen, die durch eine Gefährdungsanalyse generiert wurden:
 - o Das SRCC-TIMS darf nicht betriebshemmend wirken, z. B. bei Zugbildung, Kopfmaßen/Wenden, Flügeln, Lokwechsel.
 - o Das TIMS muss verfügbar sein, wenn der Fahrzeugverband betrieblich aktiv ist. Dies betrifft insbesondere die Energieversorgung der Komponenten. Es muss sichergestellt sein, dass das TIMS während Zugfahrten einsatzfähig ist und muss daher seinen eigenen Zustand überwachen und melden. Das TIMS ist nicht verfügbar, wenn der Fahrzeugverband sicherungstechnisch abgerüstet ist. Das heißt, dass Abstellgleise, in denen ein mit dem TIMS ausgerüsteter Zugverband abgestellt ist, durch Achszähler gesichert sein muss, um ein mögliches unkontrolliertes Abrollen zu erkennen.

Im Gegensatz dazu wurden zur Abgrenzung Funktionalitäten explizit herausgearbeitet, die der TIMS-Demonstrator nicht erbringt:

- Zuordnung zu digitalen Karten (Zuordnung Gleise, Weichenummern etc.),
- Wagendiagnose, Kupplungsüberwachung, Geschwindigkeitsüberwachung, Positionsbestimmung (notwendige Voraussetzung; Ortungssysteme müssen bereits vorhanden sein),
- Das System meldet die Gleisbelegung/Gleisfreimeldeabschnitte des Fahrzeugverbandes: Länge. Das ETCS-Bediensystem (DMI) muss ermöglichen, dass der Tf manuell eingeben kann, dass die Integrität besteht (-> ETCS-Funktion).
- Der Demonstrator berücksichtigt keine Schublokomotiven/Platooning.

2.2.2 Systemaufbau

Anschließend folgte eine Einordnung des TIMS in die Gesamtsystemumgebung (siehe Abbildung 1). Die Grundfunktionen sind:

1. Messen der Zuglänge;
2. Bewerten der Zuglänge (durch Abgleich mit der realen, initialen Zuglänge);
3. Integritätsstatus melden.

Die Kommunikation mit der ETCS-Fahrzeugausrüstung (DMI...Driver Machine Interface; EVC...European Vital Computer) wurde konzeptionell berücksichtigt, konnte jedoch aufgrund der noch nicht vorhandenen Spezifikationen und des begrenzten Projektumfangs (sowohl kostenseitig als auch zeitbezogen) nicht realisiert werden.

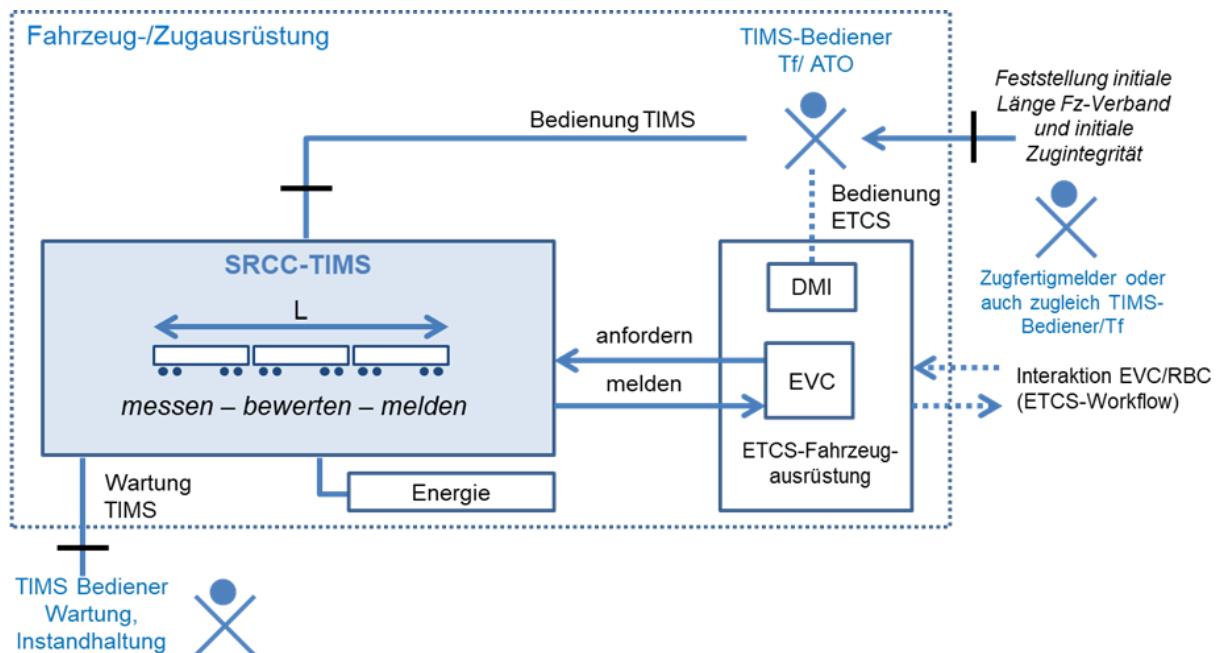


Abbildung 1: TIMS in der Gesamt-Systemumgebung

Weiterhin wurde der innere Systemaufbau zur Umsetzung der Grundfunktionen Messen – Bewerten – Melden des TIMS mit dessen Teilsystemen im Fachkonzept näher beschrieben (siehe Abbildung 2). Es beinhaltet eine Beschreibung der (Teil-)Komponenten des TIMS und deren Zusammenwirken bzw. die Aufgabenverteilung. Da die Kommunikation mit dem EVC im Demonstrator nicht vorgesehen war, wurde im späteren Lastenheft für den Demonstrator eine eigene Benutzeroberfläche mit Darstellung und Bedienung vorgesehen.

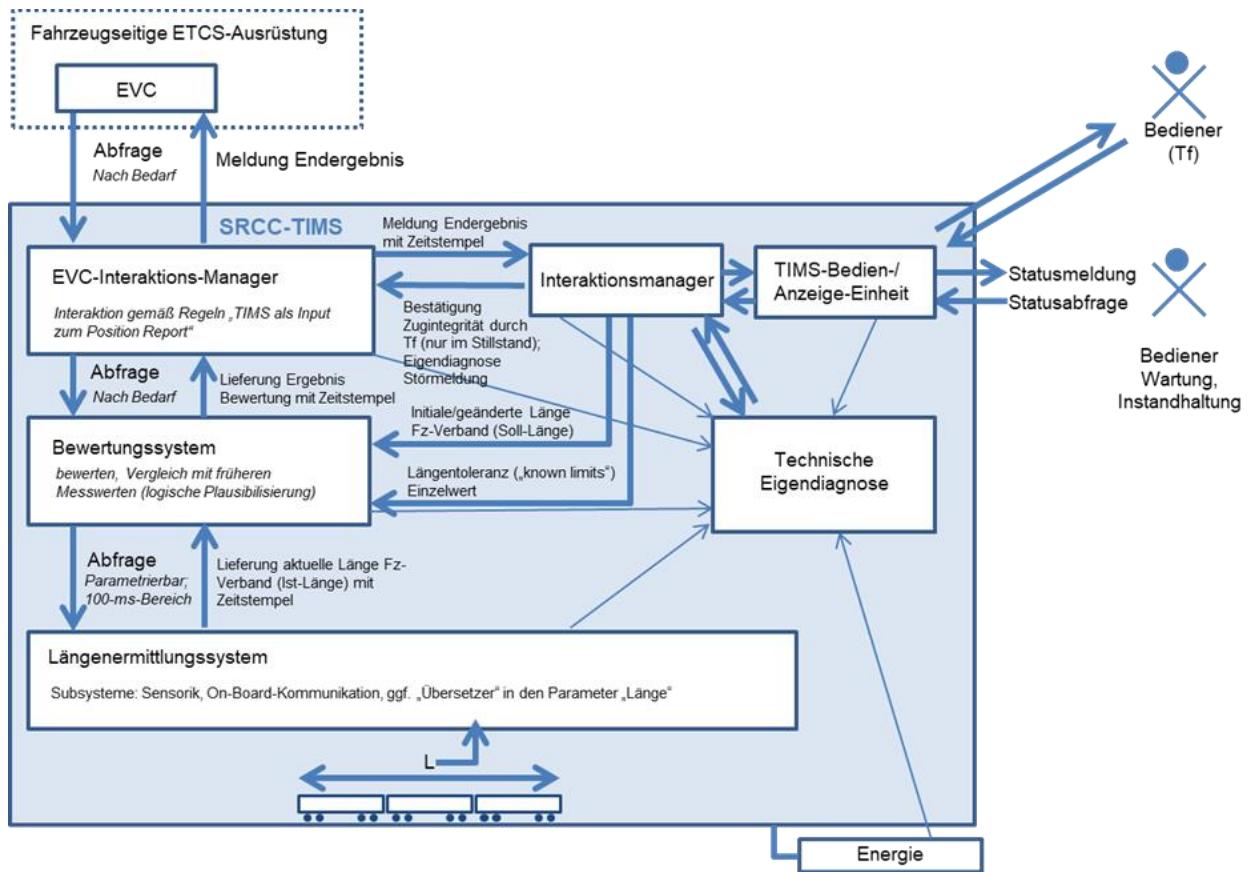


Abbildung 2: Innerer Systemaufbau TIMS; Fachkonzept

Um die Erstellung der TIMS-Software des Demonstrators zu vereinfachen und um ein gemeinsames Verständnis zum Systemverhalten zwischen den Entwicklern der Software und den Entwicklern des technischen Systems zu erreichen, wurden Abläufe des Fachkonzepts in der Unified Modeling Language (UML) modelliert. Damit konnten die Anforderungen an die Software mithilfe formaler Methoden definiert werden.

Beispielhaft ist das Sequenzdiagramm zum Fahrtbeginn in Abbildung 3 dargestellt. Ersichtlich ist das Verhalten des Systems aufgrund des Austauschs von Informationen zwischen Bediener, hier dem Triebfahrzeugführer und den TIMS-Komponenten Head of Train (HoT), End of Train 1 (EoT1), End of Train 2 (EoT2) und für die Vollversion mit dem ETCS-Fahrzeuggerät (EVC). Zu den auszutauschenden Informationen wurde der Inhalt von Datenpaketen mit der Bitbreite von Variablen definiert. Damit wird die Kompatibilität zu ETCS gewahrt und die Beschreibung von Testfällen für das Versuchsprogramm im AP 4 ermöglicht.

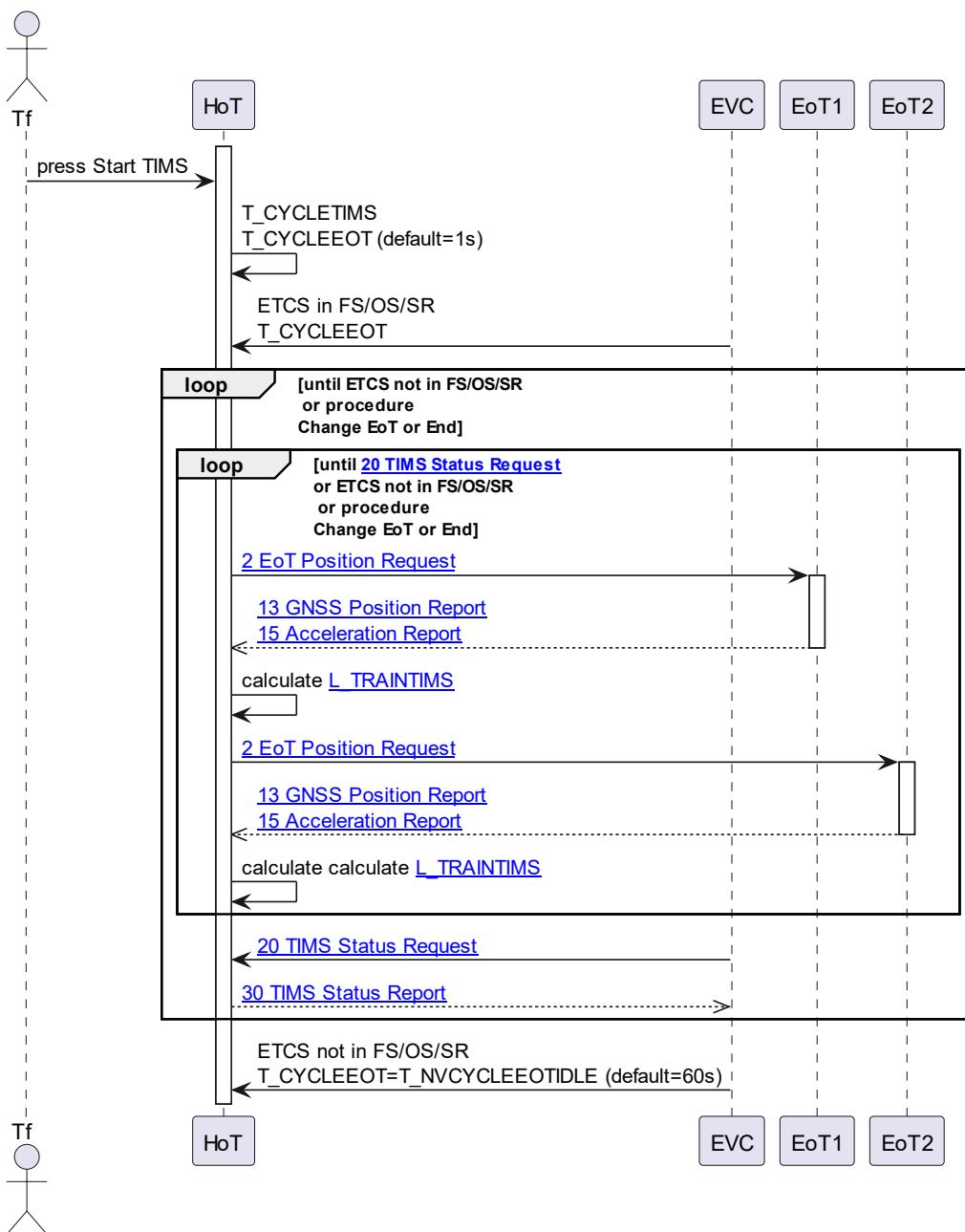


Abbildung 3: UML-Sequenzdiagramm Fahrtbeginn

2.2.3 Betriebsprozesse und Gefährdungsanalyse

Ein betrieblicher Gesamtprozessablauf wurde abgeleitet und beschrieben (siehe Abbildung 4).

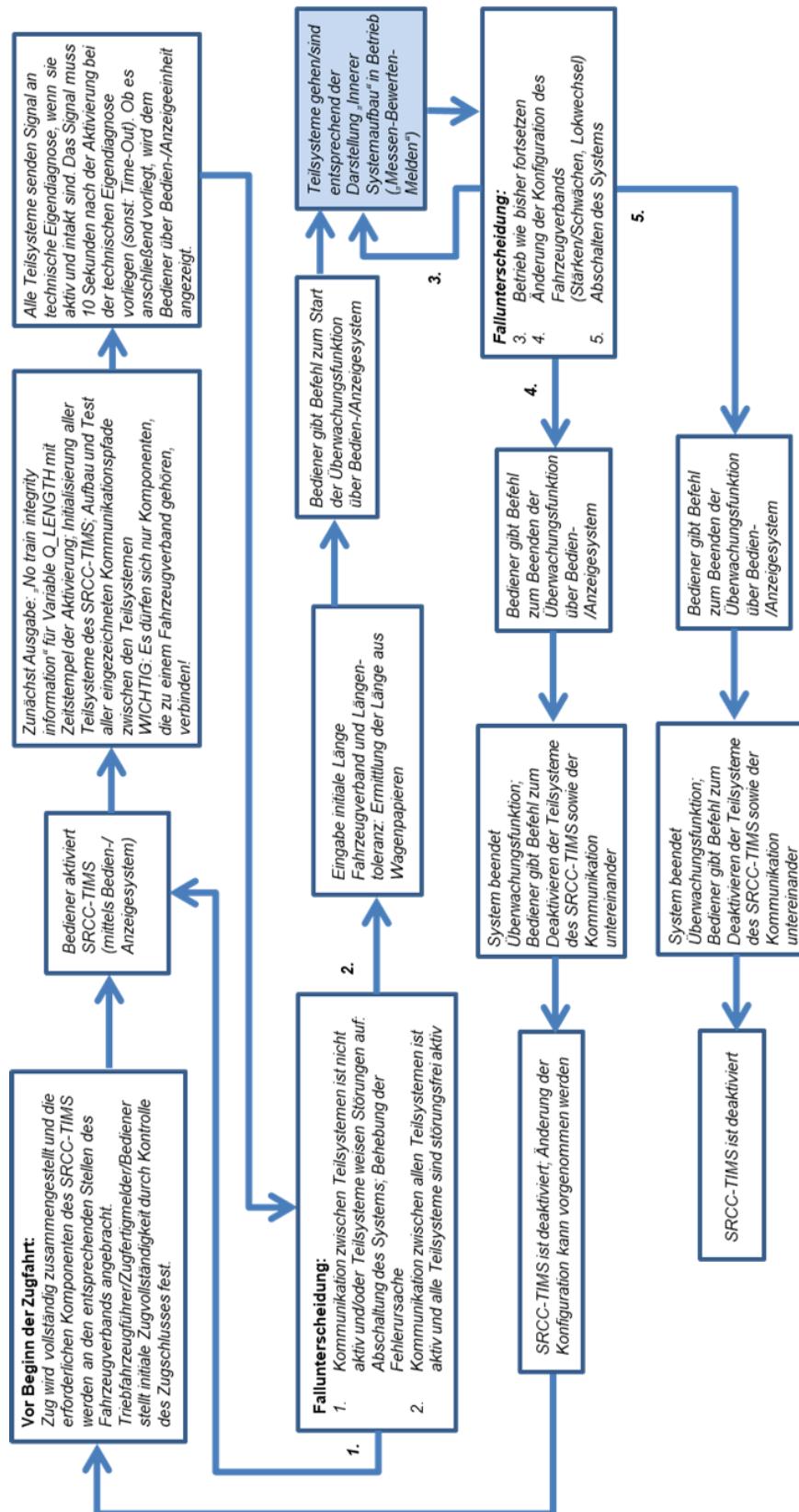


Abbildung 4: Betrieblicher Gesamtprozess TIMS

Auf dieser Basis wurde eine Gefährdungs- und Risikoanalyse durchgeführt. Dafür wurden mögliche Fehler aus der Funktion des TIMS heraus beschrieben, in Fehlerbäume eingeordnet (siehe Anlage 1), SIL-Einstufungen vorgenommen, mögliche Ursachen und Maßnahmen dagegen ausgearbeitet. Identifizierte, mögliche Fehler, Ereignisse, deren Abhängigkeiten und Gefährdungen aus der Funktion des TIMS heraus wurden analysiert (siehe Anlagen 2 und 3).

Die Herleitung der Fehler führte zu einem iterativen Prozess der Anpassung des Fachkonzepts, um Möglichkeiten der TOP-Ereignisse (Hauptfehler im Endergebnis der Zugintegritätsermittlung) zu verringern.

2.2.4 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 Punktvergabe 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.

2.2.5 Technologische Voruntersuchungen

Gemeinsam mit dem Projektpartner TU Chemnitz wurden 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 Entferungen 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-Entfernungsabschätzung 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 Ausbreitungsumgebung 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.

$$\begin{aligned}
 \text{Prediction stage : } \bar{x} &= x \quad \rho = \rho + Q \\
 \text{Update stage : } k &= \frac{p}{\rho + R} \\
 x &= \bar{x} + k(RSSI - \bar{x}) \\
 p &= p(1 - k)
 \end{aligned}$$

x , ρ , 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 „ ρ “ zu minimieren. Für die effektive Implementierung des Kalman-Filters ist ein Verständnis der Prozesse innerhalb des beobachteten Systems notwendig.

Experimentelle Untersuchungen:

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 Abbildung 5 dargestellt.

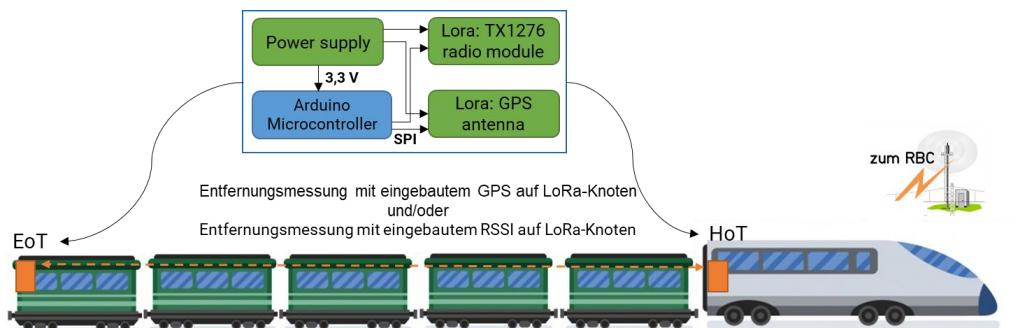


Abbildung 5: Abstandsmesssystem Übersicht

Die folgenden Parameter wurden für alle Messungen verwendet.

- Spreading Factor: 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)



Abbildung 6: Vor-Ort-Messung

Entfernungsmessung mit eingebautem RSSI auf LoRa-Knoten

a. Abstandeffekte 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).

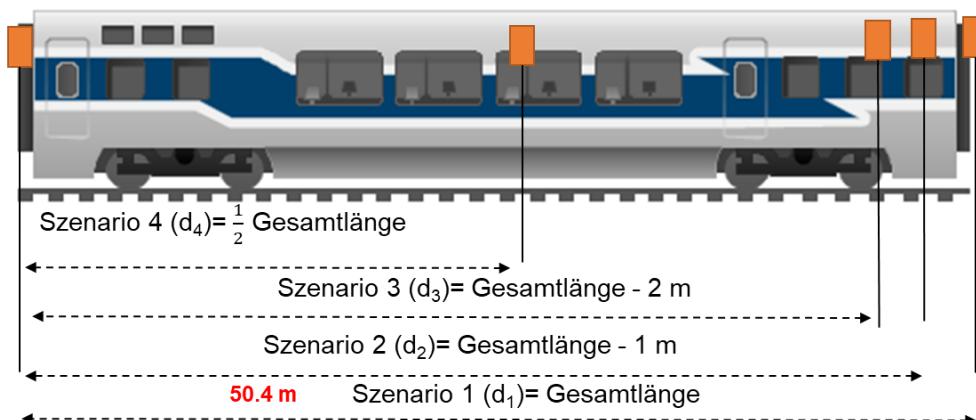


Abbildung 7: Beschreibung der verschiedenen Szenarien

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

Tabelle 1. Fehler bei der Entfernungsmessung für 4 Szenarien

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

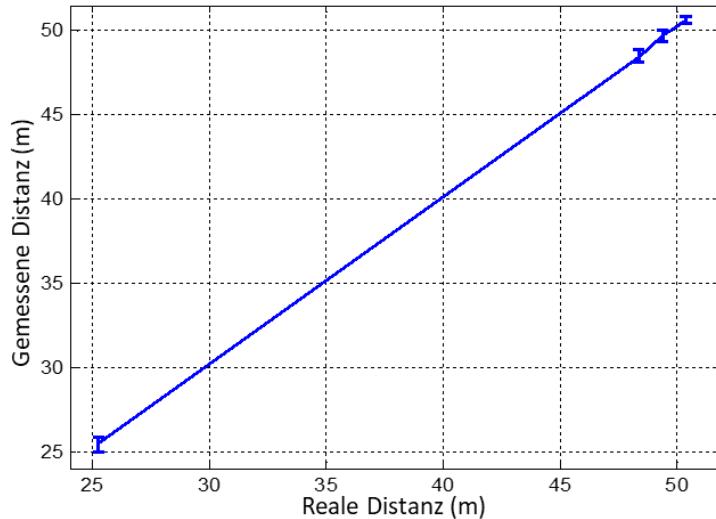


Abbildung 8: Standardabweichung der gemessenen gegenüber tatsächlicher Entfernung

b. Optimale Platzierung von Knotenpunkten, Zielsetzung:

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

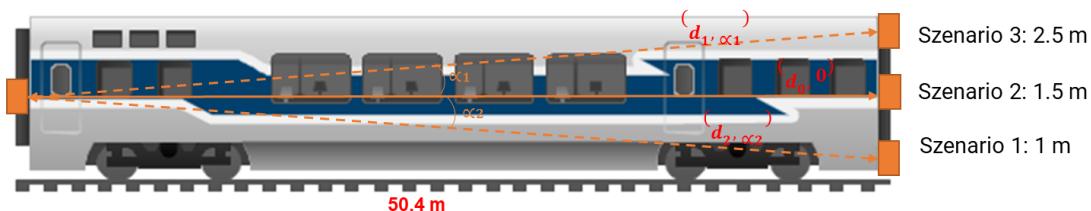


Abbildung 9: Beschreibung der verschiedenen Szenarien

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

Tabelle 2. Fehler bei der Entfernungsmessung für 3 Szenarien

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

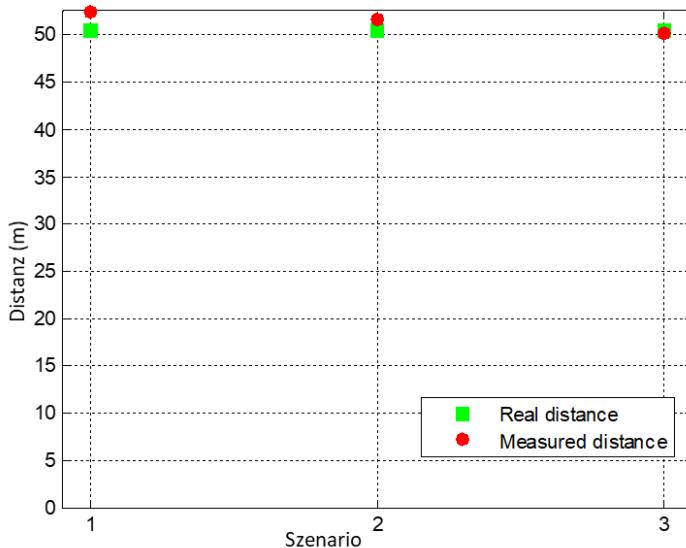


Abbildung 10: Vergleich gemessene und tatsächliche Entfernung bei Änderung der Höhe

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 29 ms bei der Übertragung eines RSSI-Wertes.

Tabelle 3. Stromverbrauch zur 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

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.

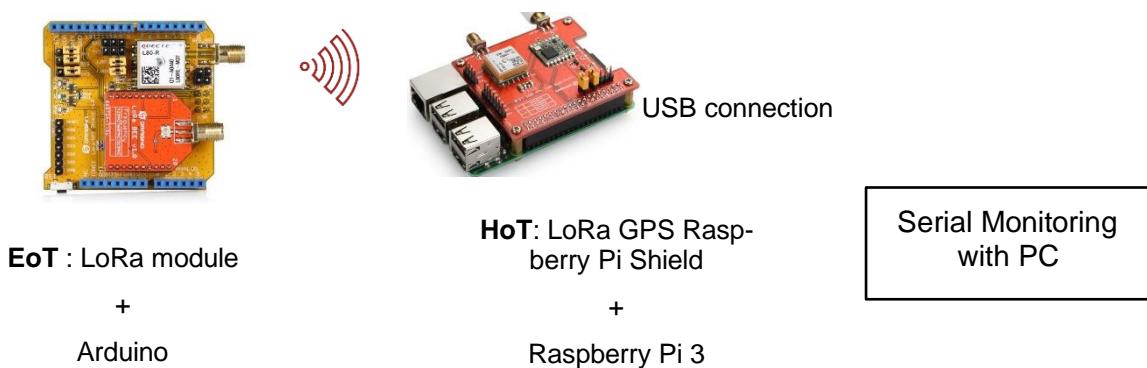


Abbildung 11: Kommunikation mit dem LoRa/GPS-Shield

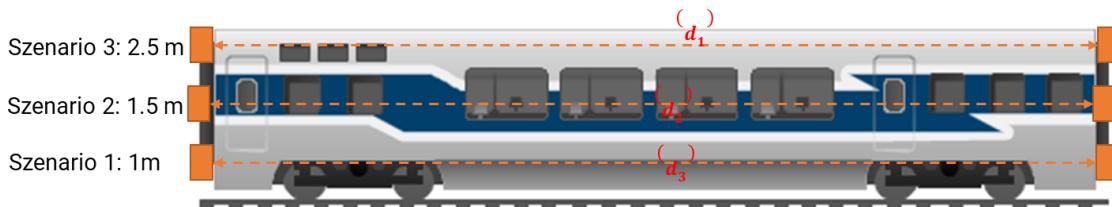


Abbildung 12: Entfernungsmessung mit LoRa-GPS

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 Abbildung 12 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.

Ergebnisse

Tabelle 4. Fehler bei der Entfernungsmessung für 3 Szenarien

	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

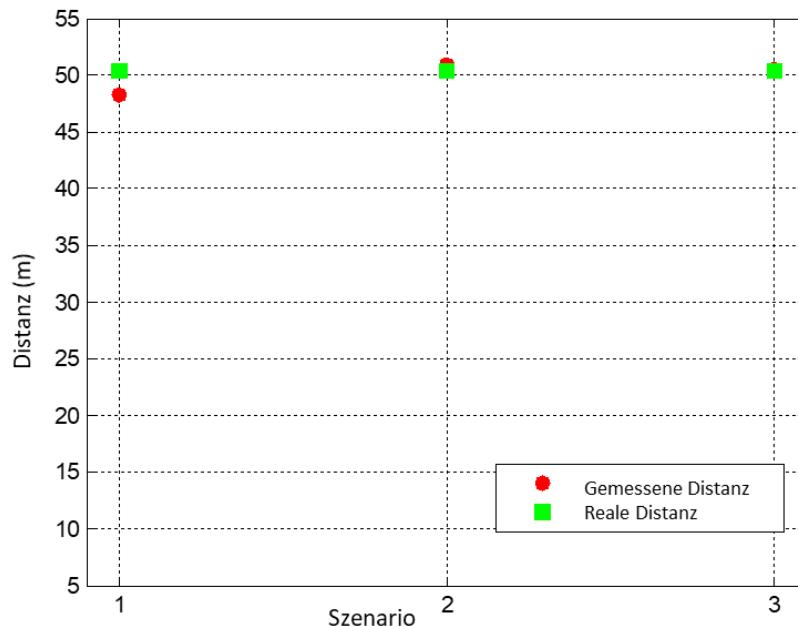


Abbildung 13: Vergleich zwischen der gemessenen und tatsächlichen Entfernung mittels LoRa-GPS

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 Zughanfangsgerät (HoT) kommuniziert, das sich in der Lokomotive befindet. Ein Beispielsetup wird in Abbildung 14 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

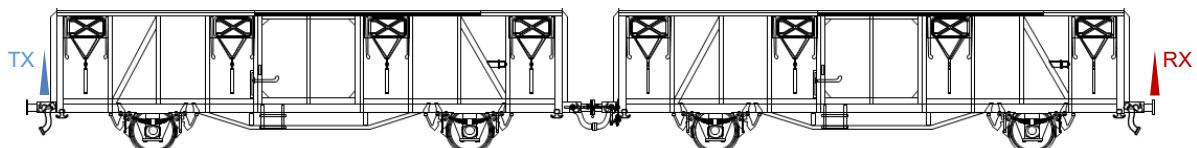


Abbildung 14: Beispielsetup

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

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

Die Freiraumdämpfung ist abhängig von der Frequenz des Trägersignals und dem Abstand zwischen Sender und Empfänger der drahtlosen Kommunikation. Daher hat die Empfangssignalleistung die Form

Das im vorangegangenen Abschnitt 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“) lizenzzfrei ist. Die beiden niedrigeren Frequenzen gehören zum drahtlosen LoRa-Standard (LongRange) wo die Signalübertragung bis zu 10 mW (169 MHz) und 25 mW (868 MHz) Strahlungsleistung keine Lizenz erfordert.

Die numerischen Auswertungen der FSPL sind in Abbildung 15 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 Waggons, 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.

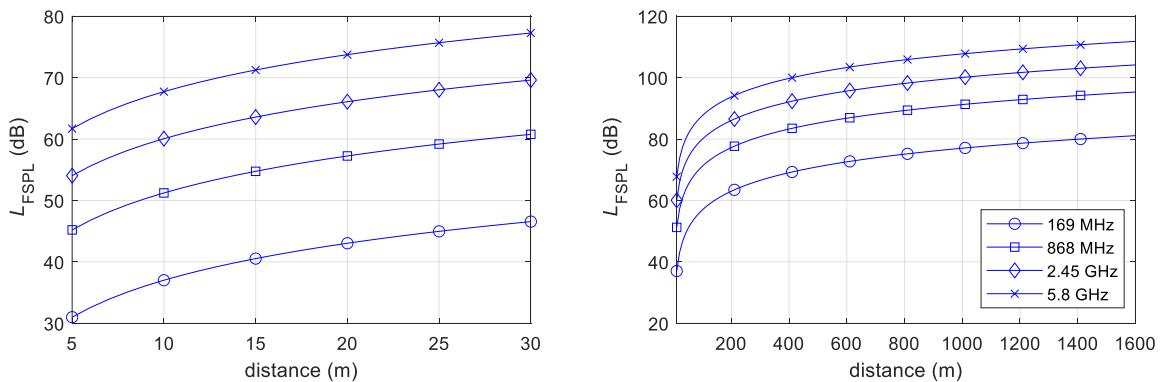


Abbildung 15: Signalabschwächung für kurze (links) und weite Entfernen (rechts)

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 Waggons zwischen den Sende- und Empfangsgeräten 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 $\theta = 0$ plat-

ziert 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.

Gemäß den vorangegangenen Abbildungen unterliegt das Signal bei Entfernungen von > 15 m und > 80 m nach der zweiten „knife-edge“ einer Dämpfung von ca. 30 dB – 35 dB 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 zeigen zudem 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, d. h. der Sender befindet sich 2,5 m hinter dem letzten Wagen, 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 1 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.

Tabelle 1: Ergebnisse der Simulation für das Pfadverlustmodell L (dB).

	Erster knife-edge		Zweiter knife-edge				Verlustleistung (dB)	Erforderliche Empfängerempfindlichkeit ohne Antenne (dBm)	Eingangsleistung (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	

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 Waggons, die zwischen dem Sender und dem Empfänger platziert sind. Abbildung 16 zeigt eine allgemeine Darstellung des Messaufbaus sowie ein Bild des Standorts.

Die Sendeantenne befand sich etwa 1...2 m hinter dem ersten Wagen, während die Empfangsantenne 1...2 m 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.

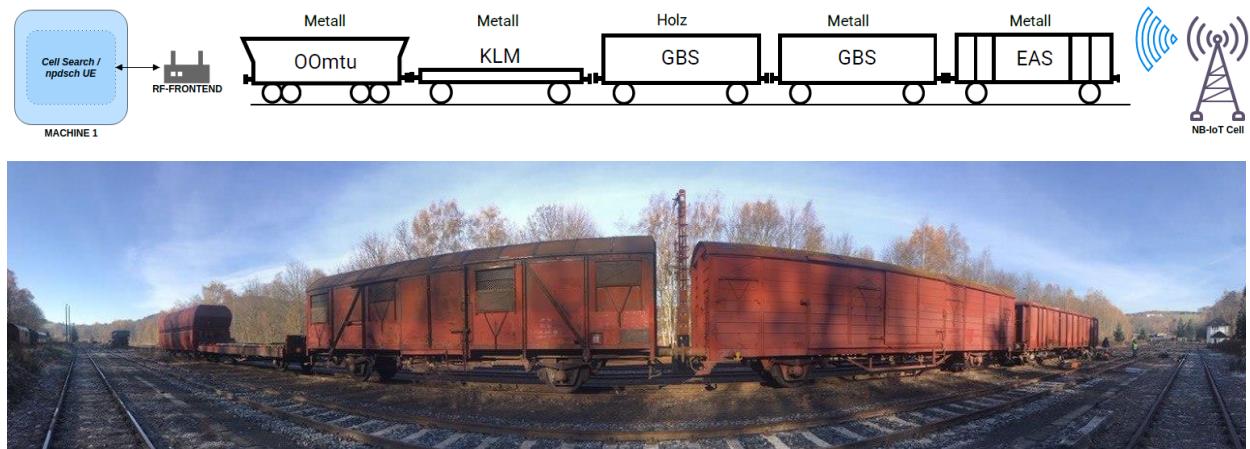


Abbildung 16: generischer Messaufbau (oben) und Panoramabild der Vor-Ort-Messung (unten)

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 2 sind die Ergebnisse der Messungen der Empfangsleistung zusammengefasst. Die Messwerte auf dem Bildschirm des Spektrumanalysators wurden beobachtet und in einer Excel-Tabelle aufgezeichnet. Tabelle 2 zeigt, 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.

Tabelle 2: Ergebnisse der Empfangsleistung und Vergleich mit den theoretisch berechneten Werten

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

Die Messungen der Empfangssignalqualität mit einem USRP-Gerät auf der Empfängerseite sind in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** und **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** 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 in Abbildung 13 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.

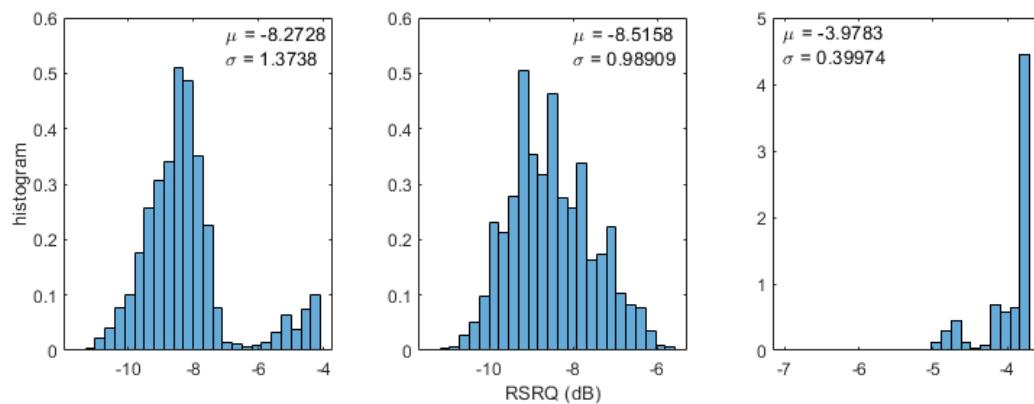


Abbildung 17: RSRQ-Messungen. Die Symbole μ und σ bezeichnen den Mittelwert bzw. die Standardabweichung

(a) 169 MHz

(b) 868 MHz

(c) 2450 MHz

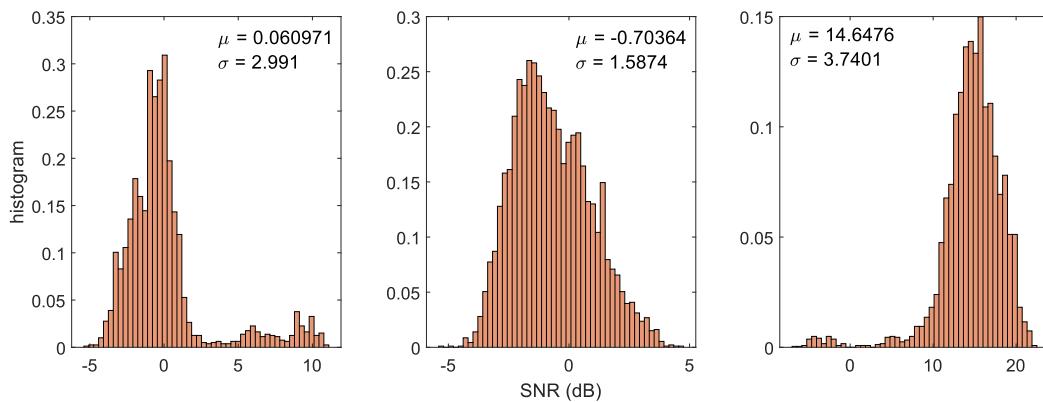


Abbildung 18: SNR-Messungen. Die Symbole μ und σ bezeichnen den Mittelwert bzw. die Standardabweichung

(a) 169 MHz

(b) 868 MHz

(c) 2450 MHz

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 Bahn norm EN 50125-1; weitere Umweltbedingungen gemäß Normen; Brandschutzangaben gemäß EN 45545-5; Anzeige, Bedienung, Maße und Befestigungsmöglichkeit der EoT-Devices in den Taschen für Zugschlussscheiben; Akku-Betrieb und -Haltbarkeit für einen Erprobungstag
- 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
- Längenermittlung (Messtechnik):
 - Beschreibung der Längenermittlung aus den GNSS-Koordinaten von HoT- und EoT-Modulen und des Korrekturdienstes SAPOS ! Hinweis: Längenmessung findet nur im HoT statt)
 - Beschreibung des RSSI-Messprinzips
 - Spezifikationen zu LoRa- und GPS-Modulen, zu SX1276-Transceiver und zum Raspberry-Pi

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 Weißflog.

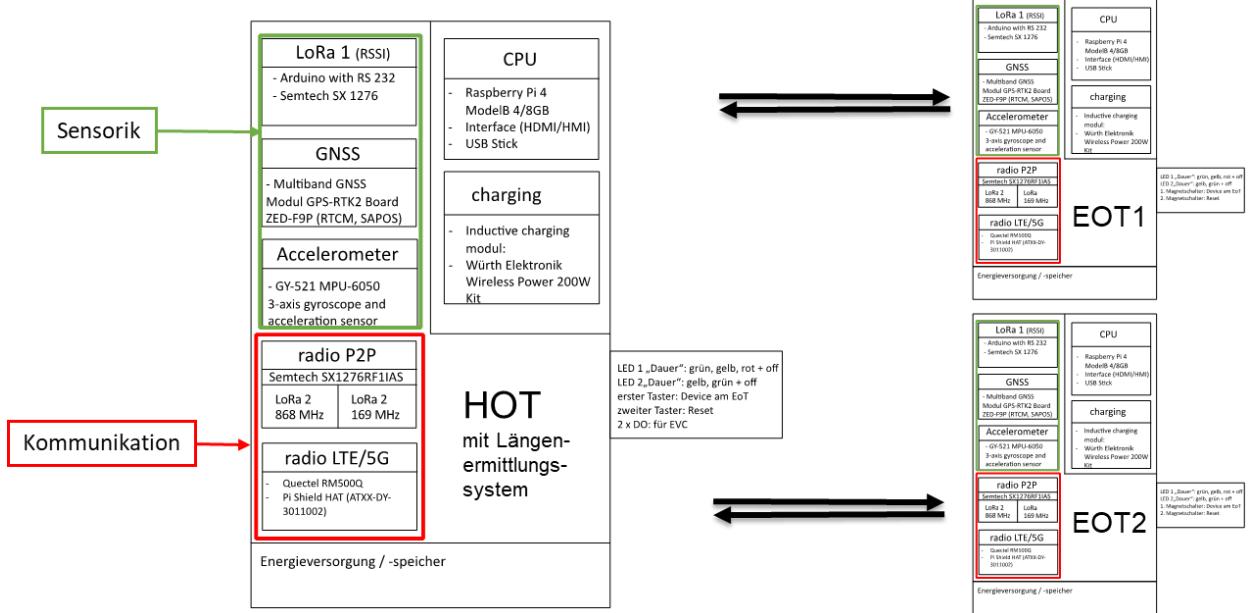


Abbildung 19: Demonstrator Hardware Konzept

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

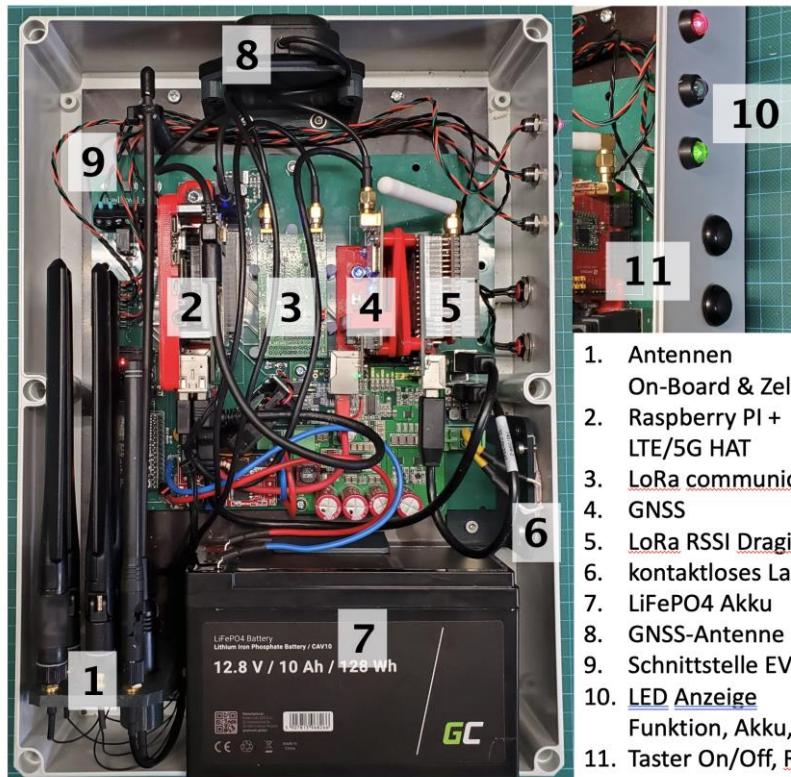


Abbildung 20: Aufbau eines TIMS-Knotens

Eine Anforderung an den Demonstrator war, dass ein Knoten alle Technologien und deren Peripherie sowie zugehörige Antennen und die Energieversorgung in einem witterungs- und stoßfesten Gehäuse aufnimmt. Das gewählte Polycarbonat Gehäuse hat eine Abmessung von 362x254x109

mm und passt somit in die vorgegebene Hüllfläche der Zugschluss Scheibe 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.

In Abbildung 21 ist das Ablaufdiagramm zum Workflow des Demonstrators, so wie er implementiert wurde, dargestellt.

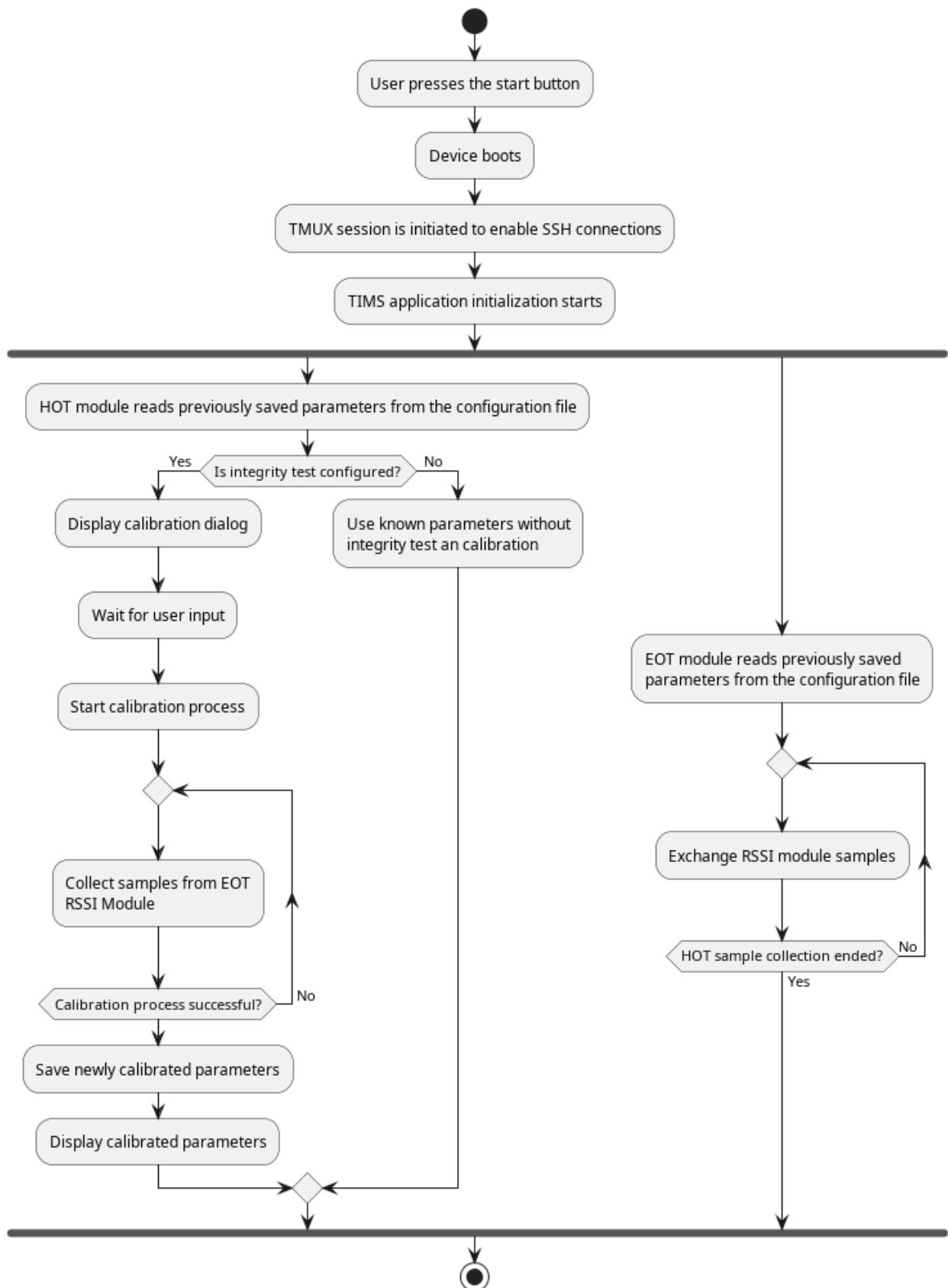


Abbildung 21: Workflow: Messvorgang mit Demonstrator

2.4 Arbeitspaket 4: Erprobungsprogramm

Im Oktober 2022 folgte der Auftakt zum AP 4, parallel zum laufenden AP3. 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 den der TIMS-Spezifikation ableitbar.

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

1. Voraberprobungen und Messungen
2. Vergleich und Bewertung von Messvarianten
3. Feldversuche statische Funktionstests der Komponenten
4. Feldversuche dynamische Testfahrten DRC (siehe Kapitel 5)**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**
5. Erprobung bei Messfahrt Schwarzenberg – Annaberg-Buchholz Süd (siehe Kapitel 5)

Voraberprobungen

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 für verschiedene Trägerfrequenzen berechnet:

- Freiraumdämpfung und Verluste durch Beugung an Hindernissen
- notwendige Übertragungsleistung

Ziel der Voraberprobung 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. Beispielweise 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

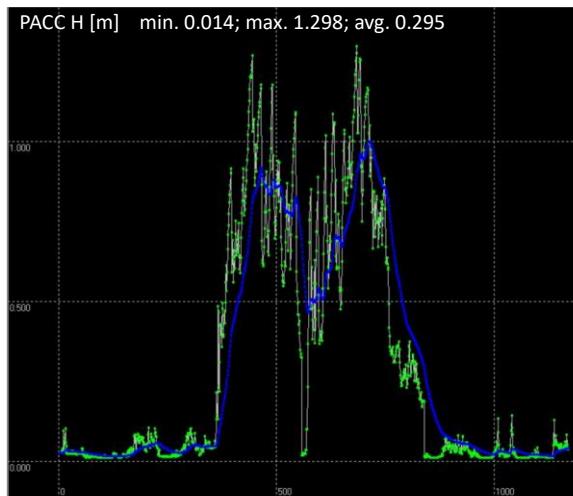
Vor den Messungen in der geplanten Testumgebung des Eisenbahnmuseums Schwarzenberg mussten Referenzwerte ermittelt werden. Zur Ermittlung von validen Referenzpositionen erfolgte im September 2022 die Aufnahme einer Referenzstrecke im Umfeld der Eisenbahnmuseums Schwarzenberg. Dabei wurden Messungen mit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



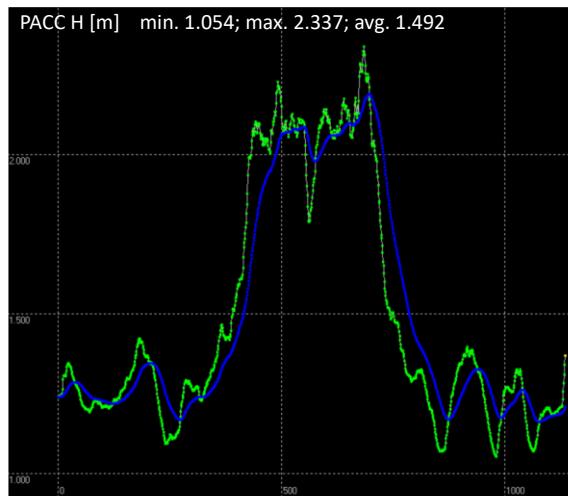
Abbildung 22: GNSS-Referenzmessung Schwarzenberg

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 (Abbildung 23). Die mittlere horizontale Genauigkeit der Position des Rovers ist bei Anwendung von SAPOS (HEPS)-Korrektur über 1m genauer. Gemessen wurde sekündlich 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.



DGNSS (SAPOS), stark bewölkt



kein DGNSS, stark bewölkt

Abbildung 23: Ergebnisse Messung mit und ohne SAPOS-Korrekturdaten

Feldversuche statische Funktionstests der Komponenten

Labortests in Zusammenarbeit mit 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 740 m, SZB

Bei diesem Versuch erfolgten erstmals 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 Zugschlusscheibe (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 740 m, SZB

Im zweiten Feldversuch wurden Messungen analog zum 1. Feldversuch vorgenommen und alle Daten in einer zentralen Logdatei zur abgelegt (LTE, LoRa comm, GNSS, ACC, LoRa-RSSI). Damit ist eine gezielte Auswertung im Nachgang zur Messung möglich. Aufgrund der eingemessene 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.



Abbildung 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 verharrt, 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 Vorabberprobungen ermöglicht.

2.5.1 Feldversuche dynamische Testfahrten DRC

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

Im Rahmen der vom SRCC ausgerichteten Digital Rail Convention (DRC) im September 2023 wurde der Demonstrator zum ersten Mal im vollen Funktionsumfang mit einem eisenbahntypischen Aufbau getestet und vorgeführt. 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 Schleissheim 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 Fahren mit gekuppeltem und ungekuppeltem Güterwagen 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 meldet. Die Kommunikation untereinander und die Funktion der Messtechnik konnten demonstriert werden. 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 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. Dies hatte zudem den Hintergrund, eine Patentidee zu schützen.



Abbildung 25: TIMS-Live-Monitor auf dem Demo Day der Digital Rail Convention



Abbildung 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 und somit wurde dieser iterativ verbessert.

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

Mit diesen Messwerten ist im Rahmen des AP 6 eine Auswertung und grafische Aufbereitung möglich.

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, 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. 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 Schleitau untersucht. 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 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Für die einzelnen Messabschnitte nach Messablaufplan, wurden die Geräte neu gestartet und ca. 1min 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 5m. 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 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) wurde die Fahrt auf einem live Monitor im Fahrzeuginnenraum 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.

Auch die dabei generierten Messdaten für

- die ermittelte Zuglänge durch die Messsysteme GNSS und LoRa RSSI,
- die Abweichung, 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 konzentriert sich auf die Auswertung der gewonnenen Daten mit dem Demonstrator. Alle gewonnenen 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 verwertbare 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 Digital Rail Convention sind im Kapitel 2.5 näher beschrieben. Im folgenden Abschnitt werden die gewonnenen Messdaten ausgewertet und diskutiert. Dabei wird vornehmlich auf das Gesamt-log-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 Integrationsermittlung mittels Messsystem aus den GNSS-Daten beschrieben.

In Tabelle 3 ist eine kompakte Übersicht der gewonnenen Datenpakete zu sehen. In Zeitabschnitt 1 fanden die Fahrvorgänge ausschließlich mit gekuppeltem Güterwagen statt. In allen weiteren Abschnitten sind auch Fahrten mit abgekuppeltem Güterwagen aufgenommen, aus diesem Grund ist die mittlere Distanz aller Messwerte deutlich größer. Weiter soll nun die Auswertung der Zeitabschnitte 1 und 3 stattfinden.

Tabelle 3: Übersicht Datenpakete zur DRC

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

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 Abbildung 27 zeigt die Geschwindigkeit und die berechnete Zuglänge aus den

GNSS-Werten der Geräte. Alle Geschwindigkeiten unter 0,1 m/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 5 m beträgt. Bei genauer Betrachtung fällt auf, dass die Abweichungen im Bereich der Fahrtvorgänge, vor allem bei zunehmender Geschwindigkeit am größten sind.

Durch das Fehlen der Zeitsynchronisation der Geräte für die Einzelmessungen (jeder einzelne Messpunkt) werden die Positionsreihenfolgen 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, interner Rechenvorgänge 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 unterschiedlich „alte“ Positionen der Einzelgeräte eingetragen werden. Werden 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 diesem Effekt zumindest grafisch entgegenzuwirken, wurde ein gleitender Mittelwert (pink) aus den letzten 10 Messungen dem Diagramm hinzugefügt. Die mittlere Distanz über dem kompletten Zeitabschnitt 1 beträgt 34,25 m. Ausgehend von einem korrekt gemessenen, physischen Abstand der beiden Geräte von 34 m ausgeht beträgt die Messabweichung weniger als 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 nicht untersucht werden.

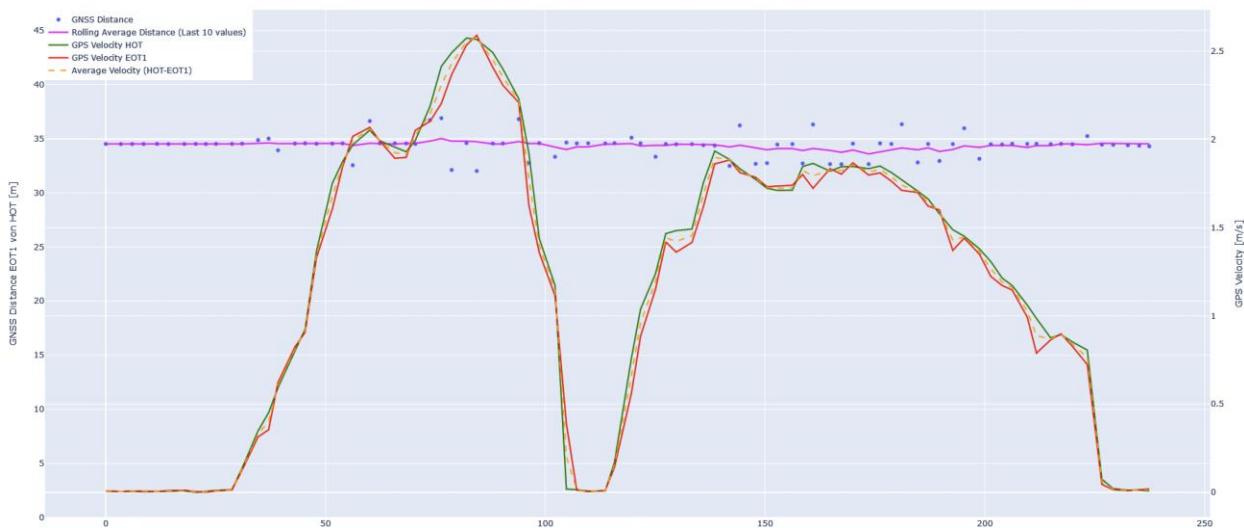


Abbildung 27: Zeitabschnitt 1, DRC

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 entspricht dem Setup aus Zeitabschnitt 1. Es wurden drei Fahrten mit abgekuppeltem Güterwagen durchgeführt und die Ereignisse auf dem Monitor live 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 ersichtlich. Ein plötzlicher Ausfall des Hauptrechners im HoT konnte als Ursache hierfür identifiziert 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 gut zu erkennen, 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 Wendevorgängen der Lok ebenfalls 0 m/s. Bei den Wendevorgängen 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 mit gekuppeltem Güterwagen immer zuverlässig die Integrität des Fahrzeugverbandes als vorhanden angezeigt. Bei allen Fahrten mit abgekuppeltem Waggon konnte ebenfalls zuverlässig der Verlust der Integrität detektiert werden. Dies geschah im Mittel bei 44 m, also die Länge des Fahrzeugverbandes von 34 m mit der Längentoleranz von 10 m.

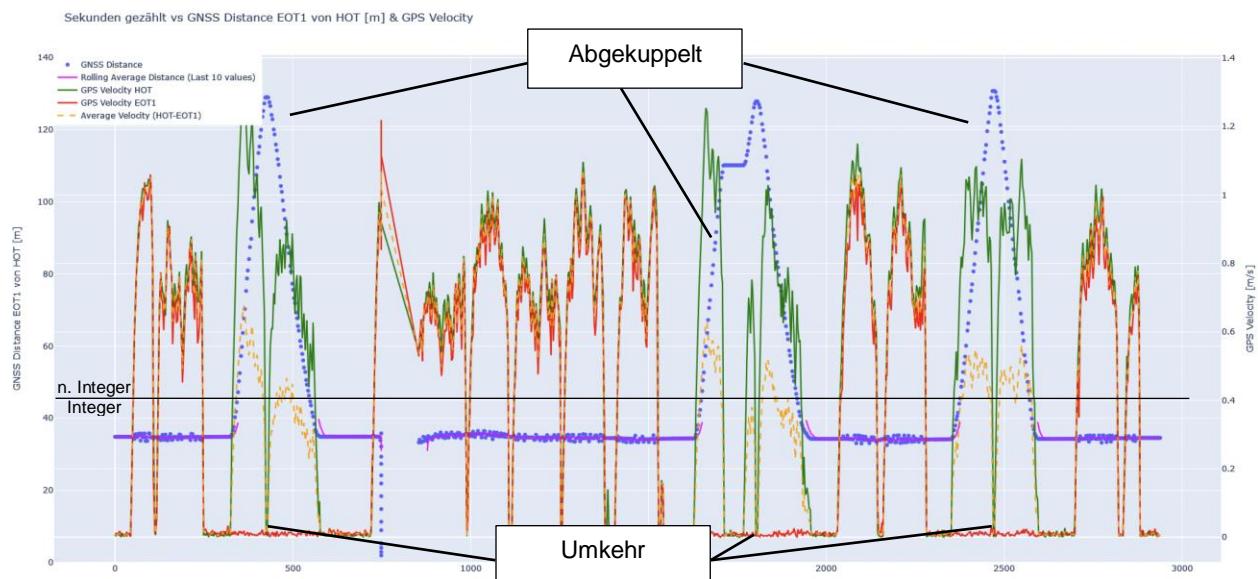


Abbildung 28: Zeitabschnitt 3, DRC

Grafische Aufbereitung der Rohdaten

In diesem Abschnitt werden die GNSS-Rohdaten aus den Log-Files der Einzelgeräte untersucht. Die Lng.- und Lat.-Koordinaten 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 sich die Fahrzeuge als Verband fortbewegt haben. Die maximale Abweichung der horizontalen GNSS-Genauigkeit lag bei 3,3 cm, die vertikale bei 5,6 cm. In der Abbildung 29 ist der seitliche Abstand beider Geräte zu erkennen. Der parallele Versatz ist mit der Aufhängung der Geräte an den Fahrzeugen zu erklären. Das EoT-Device wurde etwas weiter Richtung Fahrzeugmitte befestigt. Mit dieser Analyse lässt sich sehr gut die Leistungsfähigkeit der DGNSS-Messtechnik für das TIMS bewerten. Die hier gezeigten Messungen fanden alle bei klarem Sonnenschein und bei freier Sicht des Demonstrators statt.

Zwei Minuten vor dem Messbeginn wurden die Geräte gestartet, um so viele Satelliten wie möglich für die Berechnung der Position nutzen zu können.

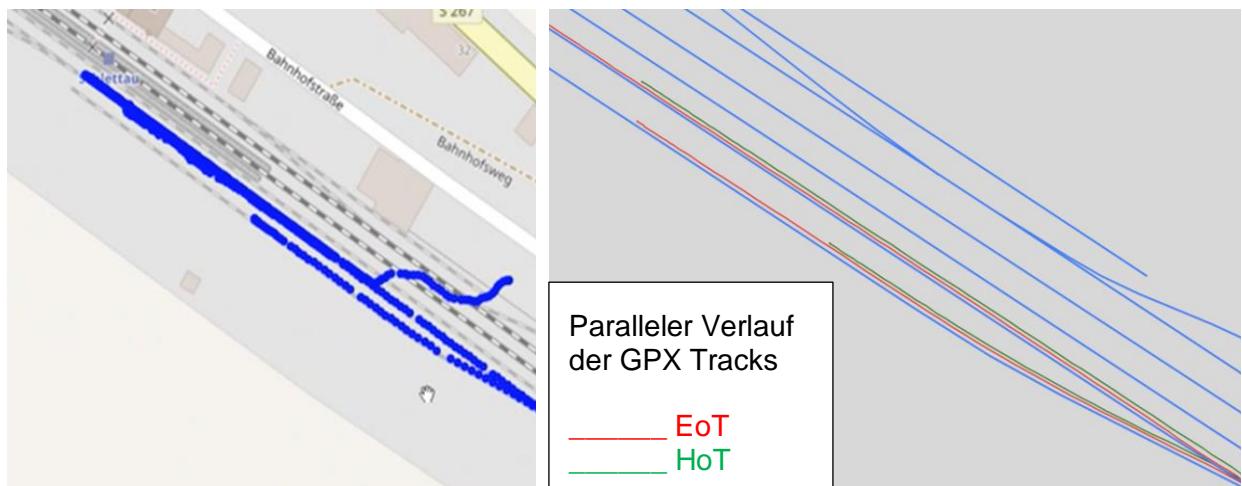


Abbildung 29: Einzelmesspunkte, DRC

2.6.2 Auswertung Messfahrt Dezember 2023

Der Aufbau zu den Messfahrten im Dezember 2023 sind 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 Matlab ausgewertet wurden.

GNSS - Positionsbestimmung und Genauigkeit

Die Genauigkeit der einzelnen Positionen lässt sich mit einer Wahrscheinlichkeit von mind. 95 % bestimmen (Ublox). Näher wird in dieser Arbeit jedoch 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 ≥ 10 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	\varnothing Geschwindigkeit [km/h]	\varnothing PACC H [m], HOT	\varnothing 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 4: GNSS-Genauigkeit und Länge in den Fahrtabschnitten



Abbildung 30: Ausschnitt GNSS-Genauigkeit aller Devices

In der Tabelle 4 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 Abbildung 30 lässt sich der Bezug der Position zum Gleis (OpenStreetMap) und Abweichung sehen. Es lässt sich eindeutig erkennen, dass EoT 1 aufgrund der Anbringung im Innenraum des Fahrzeuges eine höhere Abweichung 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. Aufgrund der Streckenbegrenzung ließ sich 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 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden**. erläutert. Es macht den Anschein, dass die Längenberechnung über GNSS sehr ungenau, 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 Abbildung 31 ist eine Aufzeichnung der Messpunkte in eine OSM-Karte zu sehen. EoT2 und HoT liegen hier sehr genau auf einem Gleis im Bhf. Schleitau. EoT1 (im Zug) liegt in diesem Fall ca. in halbem Gleisabstand daneben. In einer Animation der Einzelmesspunkte konnte dargestellt werden, dass sich die Einzelmesspunkte offensichtlich mit gleichem Abstand und exakt parallel zueinander in die Fahrtrichtung des Zuges bewegen. 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.



Abbildung 31: Einzelmesspunkte Rangierfahrt

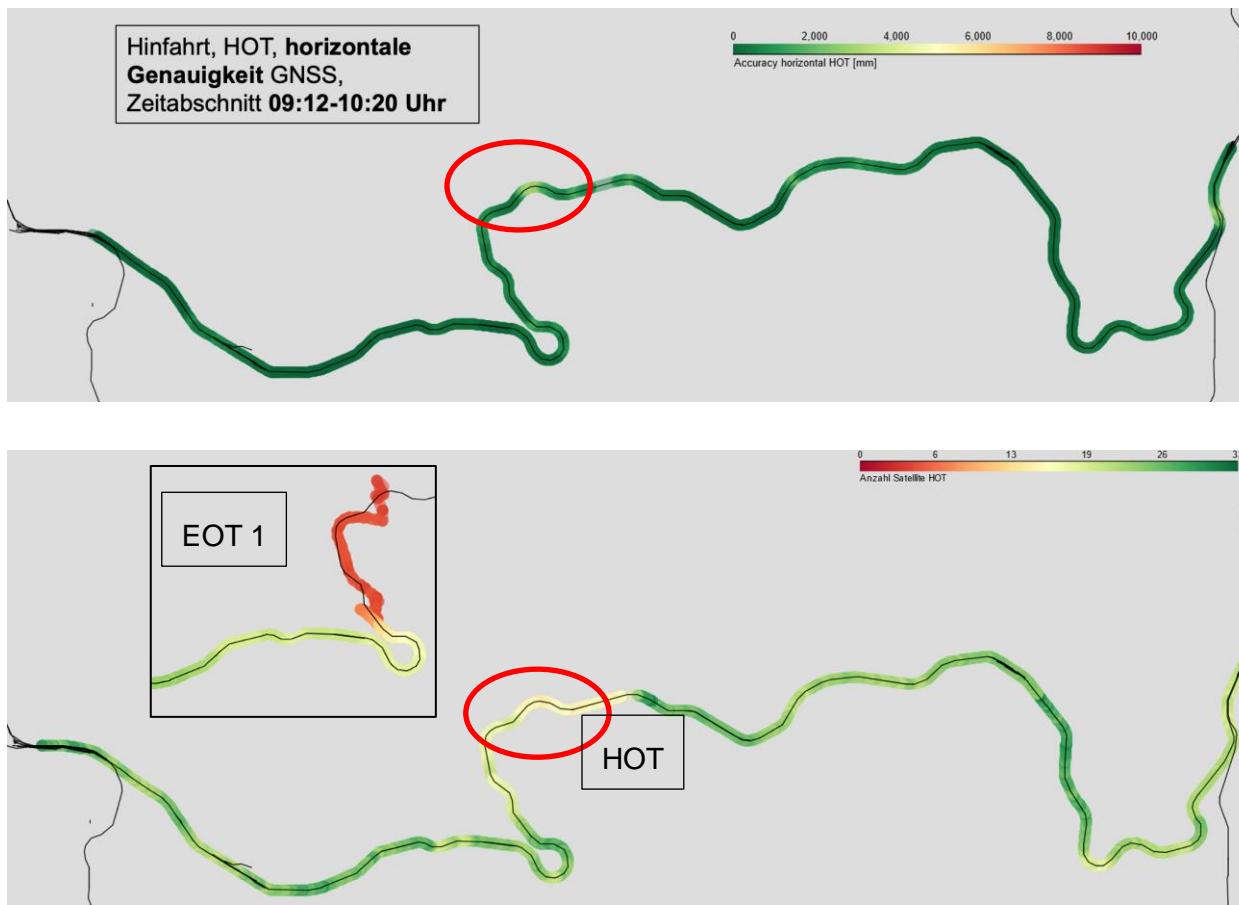


Abbildung 32: Zusammenhang der Genauigkeit (oben) und Satellitensichtbarkeit (unten)

Dass die Genauigkeit der Positionsbestimmung nicht nur von der Geschwindigkeit, sondern auch mit der Anzahl der genutzten Satelliten (alle Systeme) zusammenhängt, ist in der Abbildung 32 zu erkennen. In dem markierten Bereich sinkt die Anzahl auf 15 Satelliten, wobei es im Mittel 27...28 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. sechs 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, besonders im 5G-Standard. Die Konfiguration der Geräte am Messtag ließ lediglich eine Verbindung zu den LTE-Signalen zu. Es konnte auch kein Bezug zu den Signalen der einzelnen Basisstation (PCI, Frequenzband) hergestellt werden.

In den Abbildung 30 und Abbildung 31 werden die RSSI und SINR nur für den HoT gezeigt. Die Darstellung vereint alle an dem Tag aufgenommen Werte mit dem jeweiligen Positionsbezug aus den GNSS-Werten des HoT. Die Überlagerung der Daten bei mehrmaliger Überfahrt der gleichen Position 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.

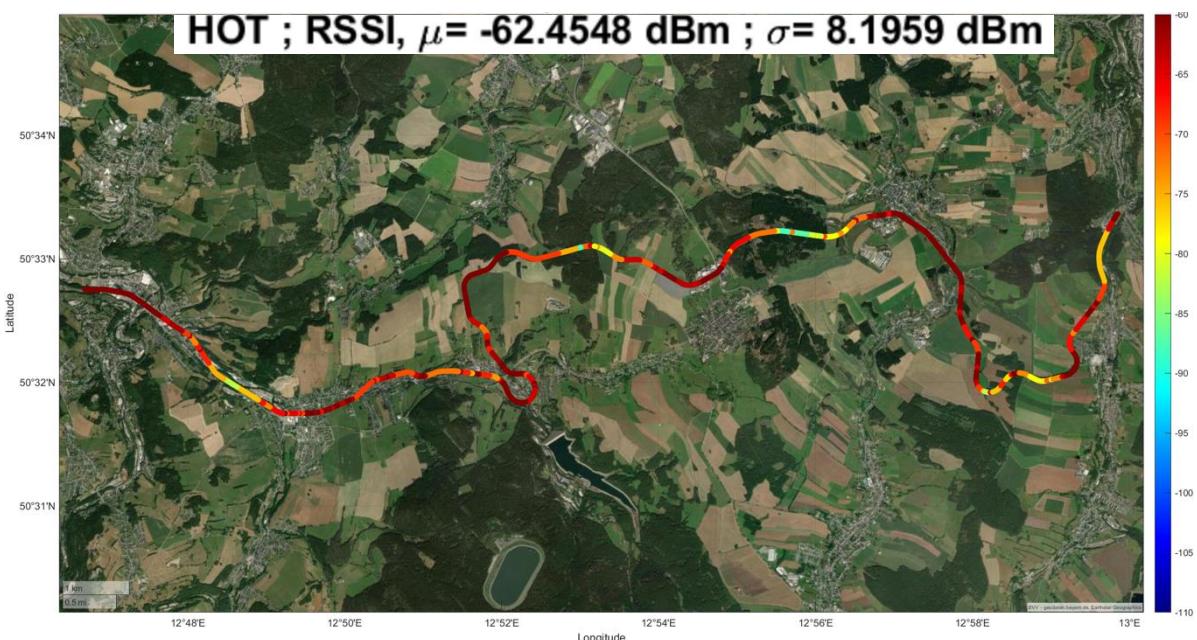


Abbildung 33: Empfangsfeldstärke – HOT

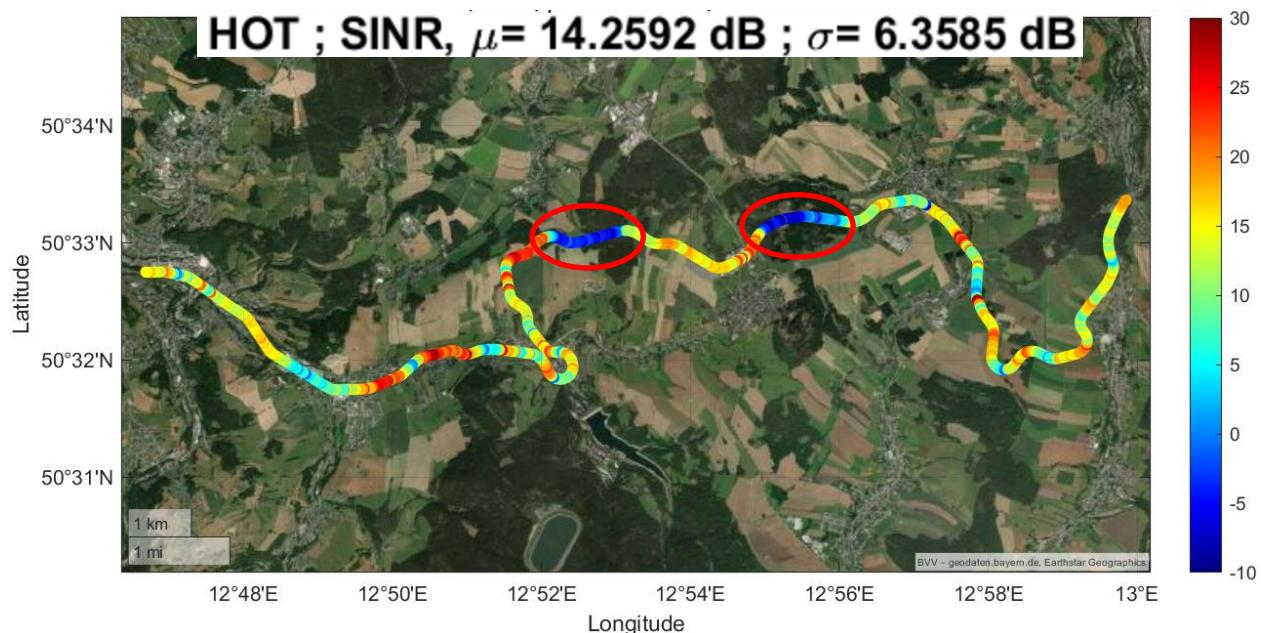


Abbildung 34: Signal-Interferenz-Rausch-Signal – HoT

Anders verhält es sich bei Betrachtung des SINR. Dieser Wert kann als qualitative Einschätzung der Mobilfunkverbindung genutzt werden. Er setzt dabei die Leistung des genutzten Signals ins Verhältnis zur Summe der Störsignale und des 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 Abbildung 30 sind die Bereiche gezeigt, bei denen tW. 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 s. Der Zug hat sich in dieser Zeit über eine Strecke von 465,5 m, mit einer Geschwindigkeit von durchschnittlich 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 Netzwerkskaner lieferten sehr ähnliche Ergebnisse, auch hier waren Verbindungsabbrüche an den markierten Stellen zu verzeichnen.

LoRa-RSSI Längenmessung

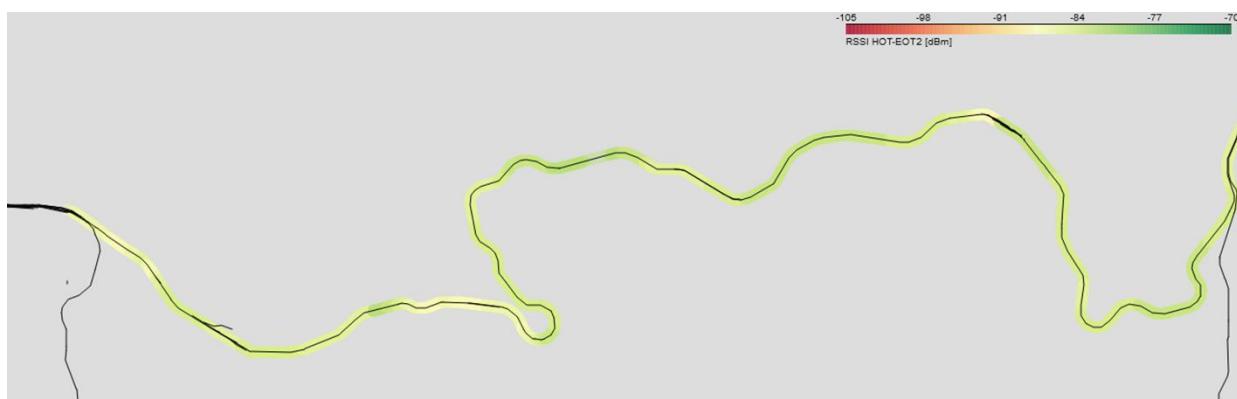
Die Kalibrierung auf die Länge von 13 m wurde zum Fahrtantritt am Bahnhof Schwarzenberg bei freier Umgebung durchgeführt und bis zum Ende aller Messungen nicht wiederholt. Diese Vorgehensweise könnte die einer bahnbetrieblichen ähnlich sein. Auch hier würde die Kalibrierung nach dem Rangieren und vor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

Fahrtabschnitt	Ø Geschwindigkeit [km/h]	Ø berechnete Länge HOT - EOT 2 [m]	minimale Länge [m]	maximale Länge [m]	Standardabweichung σ [m]	Verbindungsverlust
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 5 LoRa-RSSI Längenberechnung zu EoT 2 in den Fahrtabschnitten

In der Tabelle 5 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 Fahrzeugs eingegangen. Im Mittel aller Messungen, liegt der berechnete Wert 1,2 m (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 Abbildung 32 rot eingekreist.

Die Änderungen der Empfangsfeldstärke im Fahrverlauf ist gut in der Abbildung 32 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.



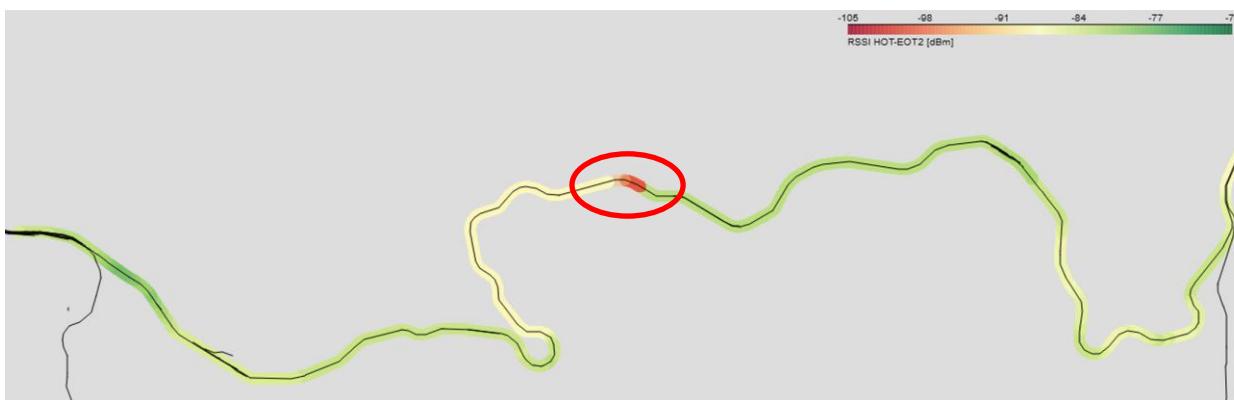


Abbildung 35: Empfangsfeldstärke LoRa-RSSI – Hin- und Rückfahrt

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 es sich um eine verhältnismäßig kurze Distanz handelt.

3 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Das Forschungsvorhaben wurde im Verbund aus TU Chemnitz, CERSS und SRCC e.V. durchgeführt. Nachfolgende Ausführungen beziehen sich ausschließlich auf den Antragsteller SRCC e.V.

Die im Rahmen des Projektes beim Antragsteller entstandenen Ausgaben betragen insgesamt 102.272,00 €. Sie liegen damit 11.553,00 € unter der bewilligten Zuwendung. Die Ausgaben wurden im Wesentlichen für Personalausgaben zur Beschäftigung wissenschaftlicher Mitarbeiter beim Antragsteller (22.568,02 €) sowie für die Auftragsvergabe zur Einbindung externer Kompetenzträger (79.651,21 €) verwendet. In geringem Umfang entstanden außerdem Reisekosten (52,77 €).

Geplant und beantragt waren ursprünglich Personalausgaben i. H. v. 69.875,00 €. Damit wurden gegenüber dem ursprünglichen Fördermittelantrag 47.306,98 € weniger an Personalmitteln ausgegeben. Dies liegt im Wesentlichen an Schwierigkeiten des Antragstellers die entstandene Projektstelle adäquat zu besetzen. Der Antragsteller entschloss sich daher bereits frühzeitig im engen Austausch mit dem Projektträger Personal mit dem Projekt zu betrauen und zu finanzieren, dass bei der 100 %-igen Tochter SRCC gGmbH angestellt war. Damit sollte der Gefahr entgegengewirkt werden, dass der Projektfortschritt und die Projektziele nicht dem Plan entsprechen. Es folgten daher während des Projektverlauf zwei Mittelumwidmungsanträge, da das Personal des Tochterunternehmens formal aus Auftragsvergabe definiert wurde und damit über die Position 0835 zu finanzieren war. Insgesamt wurden somit 79.651,21 € für Auftragsvergabemittel ausgegeben. Davon entfallen 40.051,21 € auf die Finanzierung von Personal der SRCC gGmbH. Zur Einbindung externer Kompetenzträger standen ursprünglich 43.000,00 € zur Verfügung, von denen 3.400,00 € nicht verausgabt wurden. Die verausgabten 39.600 € beziehen sich auf einen Auftrag an das Institut für Bahntechnik, dass hier das Vorhaben als Kompetenzträger des Sektors unterstützte.

Ausgaben für Dienstreisen im Inland wurden mit 52,77 € deutlich weniger benötigt als geplant (1.000 €). Dies ist auf die mit der Covid19-Pandemie einhergehenden (Reise-)Einschränkungen

und die regionale Verteilung der am Projekt beteiligten Partner (Dresden, Chemnitz, Annaberg-Buchholz) zurückzuführen. Häufig wurden Projektbesprechungen online durchgeführt, um zügiger und damit effizienter die notwendigen Absprachen durchzuführen und nächste Schritte abzustimmen. Dies war zum Zeitpunkt der Antragstellung nicht absehbar.

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 gewonnen 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 die einzelnen Technologien, die die TIMS-Demonstratoren zur Verfügung stellen, für weitere Kommunikations- und Konnektivitätsanwendungen am Campus eingesetzt werden. Die gewonnen 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. Bsp. 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 beantragten 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 Zugschluss-scheibe“; Anbringung dieser Scheibe an den jeweils letzten Wagen des Zuges an der bisherigen, genormten Stelle für das Zugschlussignal (Güterwagen)

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 Laufzeitmes-sung 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.

Patentanmeldung

Gemeinsam mit der TUC läuft über deren Patentinformationszentrum (PIZ) eine Patentanmel-dung zu dem in Kapitel 5 benannten Transferansatz der „Elektronischen Zugschluss scheibe“.

Veröffentlichungen

- DRC und Veröffentlichung dazu im Eisenbahningenieur
- Weitere Veröffentlichung in der Fachzeitschrift Signal+Draht ist in Arbeit
- Improving the Reliability of Long-Range Communication against Interference for Non-Line-of-Sight Conditions in Industrial Internet of Things Applications
- Neues Folgeprojekt soll beantragt werden
- Veröffentlichung von Juli 2023

An Experimental Comparison of LoRa versus NB-IoT over Unlicensed Spectrum using

Software Defined Radio

10.1109/EuCNC/6GSummit58263.2023.10188278