

Sachbericht zum Verwendungsnachweis

Teil I – Kurzbericht

WIR!-Projekt: „Train Integrity Monitoring System“ (FKZ.: 03WIR1206C)

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.

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.

2 Ablauf des Vorhabens

Projektpartner des Vorhabens waren:

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

Das Projekt wurde in sechs Arbeitspakete gegliedert (Abbildung 1).

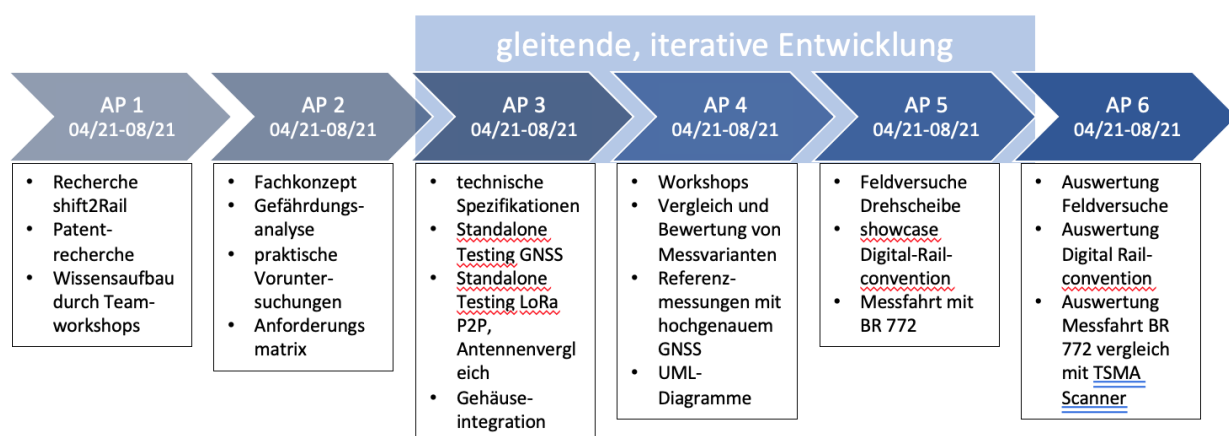


Abbildung 1: Projekttablauf

Um den Demonstrator für das Zugintegritätsüberwachungssystem (TIMS) spezifizieren zu können, wurden im AP 1 umfangreiche Recherchen zu den Rahmenbedingungen und dem aktuellen Stand der Technik durchgeführt.

Aufbauend darauf erfolgte im AP 2 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 ein 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 fanden einige Messungen und Voruntersuchungen zur Eignung verschiedener Technologien statt. Mit diesen konnte durch die Zusammenarbeit aller Projektpartner ein TIMS-Lastenheft als Systemspezifikation erstellt und an das Ingenieurbüro Weißflog übergeben werden (Gesamtsystemübersicht siehe Abbildung 2).

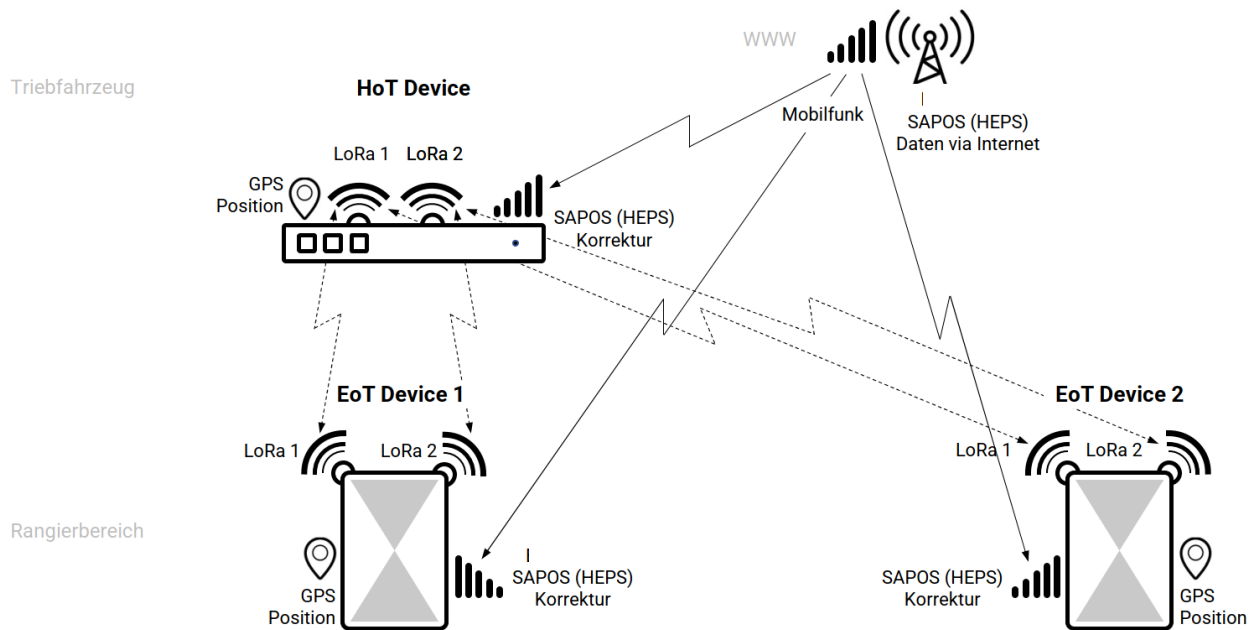


Abbildung 2: Gesamtsystem TIMS-Demonstrator

Im A3 3 wurden die technischen Komponenten des Systems spezifiziert und das Zusammenwirken der Geräte, der Satellitenortung und der Kommunikation getestet. Im parallel bearbeiteten AP 4 wurden betriebliche Abläufe bei der Eisenbahn und die Integration des TIMS beraten, Referenzmessungen durchgeführt und UML-Ablaufdiagramme erstellt. Die Einzelschritte und die Vorgehensweise bei der Versuchsdurchführung wurden definiert, die Hardware und der einzelnen Technologien des TIMS-Demonstrators in Betrieb genommen.

Im AP 5 wurden Messungen und Versuche in mehreren Test-Iterationsstufen im Raum Annaberg durchgeführt. Zunächst erfolgten statische Messungen im Eisenbahnmuseum Schwarzenberg. 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. Anschließend wurden jeweils entsprechende Änderungen zur Weiterentwicklung des Demonstrators vorgenommen und somit wurde dieser iterativ verbessert.

Am sogenannten Demo Day der Digital Rail Convention (DRC) wurden weitere Tests bei Rangierfahrten im Bahnhof Schlettau durchgeführt. Diese dienten zugleich der öffentlichen Projektdemonstration vor einem Fachpublikum. Nachdem Erkenntnisse aus diesen Tests abgeleitet wurden, wurde eine weitere Testfahrt spezifiziert. Ziel war es hierbei, mit einem Schienenbus 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 im AP 6 gemeinsam ausgewertet.

3 Zusammenfassung der wesentlichen Ergebnisse

Folgende Ergebnisse konnten erzielt werden

- Erstellung eines Fachkonzepts für TIMS-Demonstrator
- Definitionen Vorgaben für Erprobung
- Erstellung von Komponenten als Demonstrator zum Nachweis der Machbarkeit der Feststellung und Überwachung der Zugintegrität im Güterverkehr
- Durchführung umfangreicher technischer Erprobungen und iterativer Weiterentwicklungen
- Nachweis, dass die gekoppelten EoT/HoT-Devices auf Lokomotive und Waggon durch ihre Kommunikation untereinander und die installierte Messtechnik die Integrität dieses Zugverbands korrekt gegeben bzw. verloren melden
- Auswertung von Logfiles als Basis für Weiterentwicklung des Systems

Sachbericht zum Verwendungsnachweis

Teil II – Ausführlicher Bericht

WIR!-Projekt: „Train Integrity Monitoring System“
FKZ.:03WIR1206C

Laufzeit: 02/2021 – 01/2024

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

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 tlw. parallel bearbeitet worden. Somit konnten Zwischenergebnisse mit den einzelnen Modulen der Technologien erzeugt werden. Diese wiederum waren essenziell um den Demonstrator als Gesamtsystem zuverlässig und aussagekräftig für seine Aufgaben zu entwickeln. Durch diese Vorgehensweise konnten Lieferverzögerungen der Bauteile für den Projektfortschritt genutzt werden. Zudem lieferten die Zwischenergebnisse wesentliche Grundlagen für die beauftragte Softwareentwicklung.

Geplante Struktur der Arbeitspakete laut Antrag:

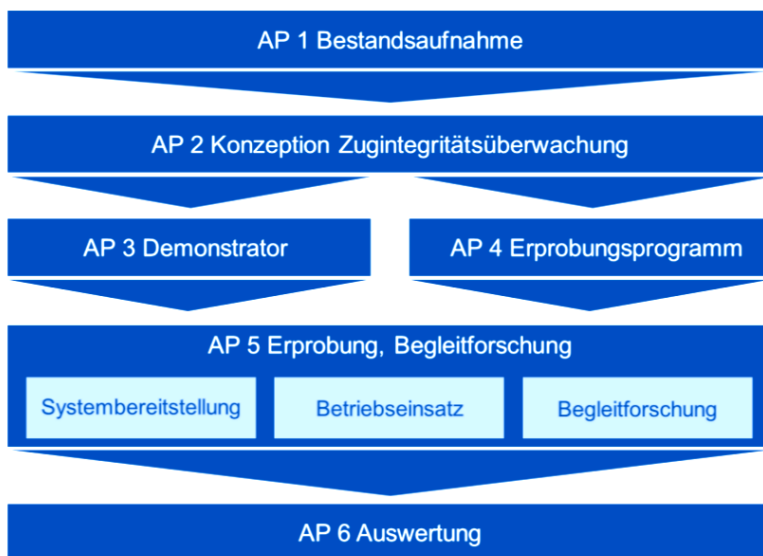


Abb. 1 Arbeitspaketstruktur laut Antrag

Durchgeführte Arbeiten anhand der Arbeitspakete und deren Zeiten:

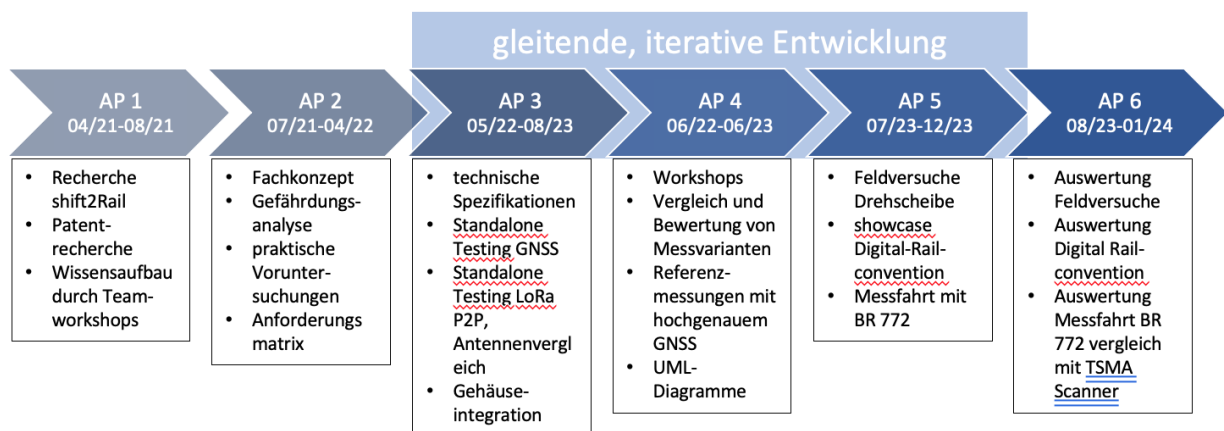


Abb. 2 zeitlicher Ablauf und durchgeführte Arbeiten

2 Durchgeführte Arbeiten

2.1 Arbeitspaket 1: Bestandsaufnahme

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

- Überblick über die bisherigen Forschungsergebnisse aus dem europäischen Forschungsprogramm Shift2Rail (Projekt-Bereich ETALON): Zusammenfassung und Inhaltsübersicht über die Shift2Rail-Dokumente („Deliverables“) in einer Datei
- Sammlung von Anforderungen an TIMS, die in Shift2Rail definiert wurden:
 - Anforderungen aus D2.1 – Functional Requirements Specification: Grundsätzliche Annahmen; High-level-funktionale Anforderungen; funktionale und Leistungsanforderungen; Charakteristik des Equipments; betriebliche Anforderungen
 - Anforderungen aus D2.2 – System Requirements Specification: Module von Sensorknoten; Umweltbedingungen; Abstandssensor; Antennen; SIL4-Prinzipien; Quality of Service für ggf. vorhandene streckenseitige Object Controller
 - Anforderungen aus D2.3 – Engineering Rules and Maintenance Requirements: RAM Parameter (MTTRS, MTBF, Lebensdauer etc.); Instandhaltungsanforderungen
 - Anforderungen aus D3.5 – Communication Systems and RF Components: RAMS-Parameter
 - Anforderungen aus D4.1 – Train Integrity Concept and Functional Requirement Specification: Zugintegritätskriterien; Netzwerk; FHA über FMECA-Ansatz; Anforderungen an die Funkkommunikation; Anforderungen an Energy Harvesting
 - Anforderungen aus D4.2 – Functional Architecture & Interface Specification
- Erarbeitung einer Übersicht über international verwendete EoT-Devices:
 - Daiken EoT-Device (Brasilien):
 - überwacht Bremsleitung und Zugintegrität; Nutzung als Notbremse möglich
 - EoT über Zwei-Wege-UHF mit jeder Cabin Display Unit
 - Energieversorgung über Druckluft der Bremsleitung
 - Bewegungssensor meldet Stillstand des letztem Wagens
 - Hochleistungsantenne, stoßfest und mit spezieller Verkleidung
 - sehr robustes Gehäuse mit Vibrationsschutz
 - TrainLink NG5 ATX EoT von der Firma Webtec (USA): Prinzip wie Daiken
 - Niksar (Australien): wie Daiken
 - Inteletrack Railway Technology End of Train Telemetry (Südafrika):
 - analog zu Webtec und Daiken; zusätzlich: Remote head – Fernsteuerung/Überwachung über Zentrale, wenn Modul 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 System Requirement Specification**
 - Einführung; Überblick über alle Kapitel/Anforderungen
 - grundsätzliche Architektur/Komponenten des Systems, Schnittstellen
 - Verfahren der Kommunikation, Datenformate, Datenpakete/Variablen/Nachrichten relevant für TIMS
 - Prozeduren, Startverfahren
 - Betriebsarten und Übergänge
 - **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-Fahrzeugschreiber 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): noch keine Definition der Schnittstelle zwischen TIMS und EVC vorhanden.
- Anforderungen der Deutschen Bahn: Kontaktaufnahme zu Kollegen der Abteilung „Digitalen Schiene Deutschland“ und Austausch zu diesen Anforderungen (z. B. Zeitverhalten für Datenaustausch) sowie möglichen Fehlerquellen; Risikoanalyse „Sichere Zuglängen“ 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 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 grundlegende 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.
- Das SRCC-TIMS meldet den TIM-Status mit einer **Latenzzeit** von im Regelfall 3 Sekunden nach Abfrage durch den EVC. Längere Latenzzeiten sind nicht sicherheitsgefährdend, wirken sich aber negativ auf die Streckenkapazität aus.
- Das SRCC-TIMS meldet den TIM-Status mit einer Frequenz von im Regelfall einer Meldung aller 10 Sekunden.
- 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.
- Das SRCC-TIMS erlaubt die Veränderung der Konfiguration des Fahrzeugverbandes, z. B. durch Stärken/Schwächen des Fahrzeugverbandes.
- Sicherheitsanforderungen/nicht funktionale Anforderungen an das SRCC-TIMS, die durch eine Gefährdungsanalyse generiert wurden
- Qualitäts-/Performanzanforderungen, die durch eine Gefährdungsanalyse generiert wurden

2.2.2 Systemaufbau

Anschließend folgte eine Einordnung des TIMS in die Gesamtsystemumgebung (siehe Abb. 3). Die Grundfunktionen des TIMS sind:

1. Messen der Zuglänge;

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

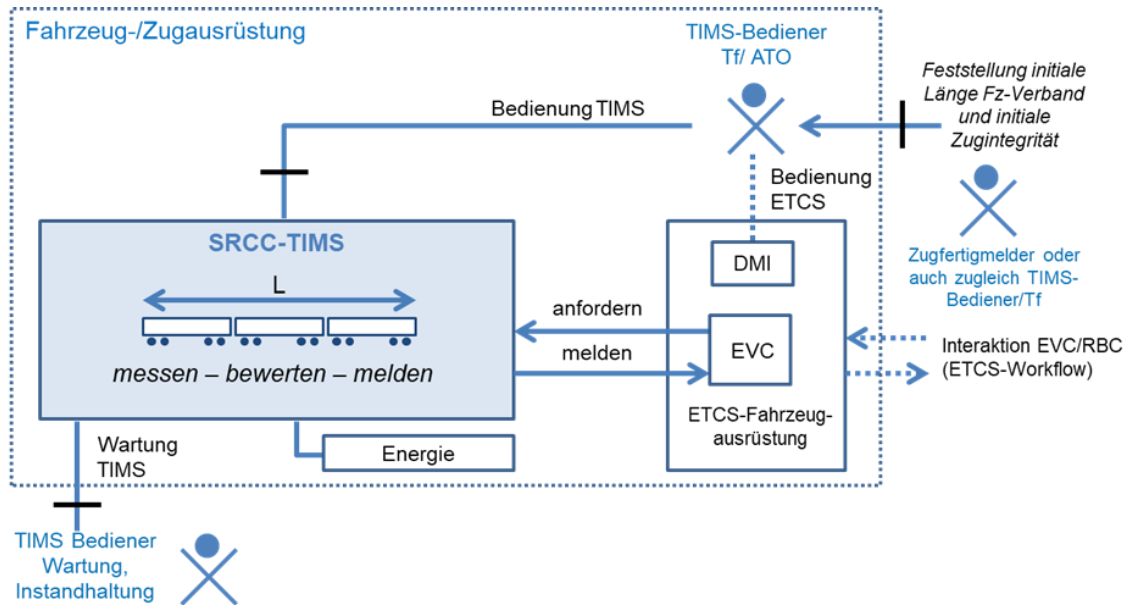


Abb. 3: TIMS in der Gesamt-Systemumgebung

Weiterhin wurde der innere Systemaufbau zur Umsetzung der Grundfunktionen Messen – Bewerten – Melden des TIMS mit dessen Teilsystemen im Fachkonzept näher beschrieben (siehe Abb. 4). Es beinhaltet eine Beschreibung der 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.

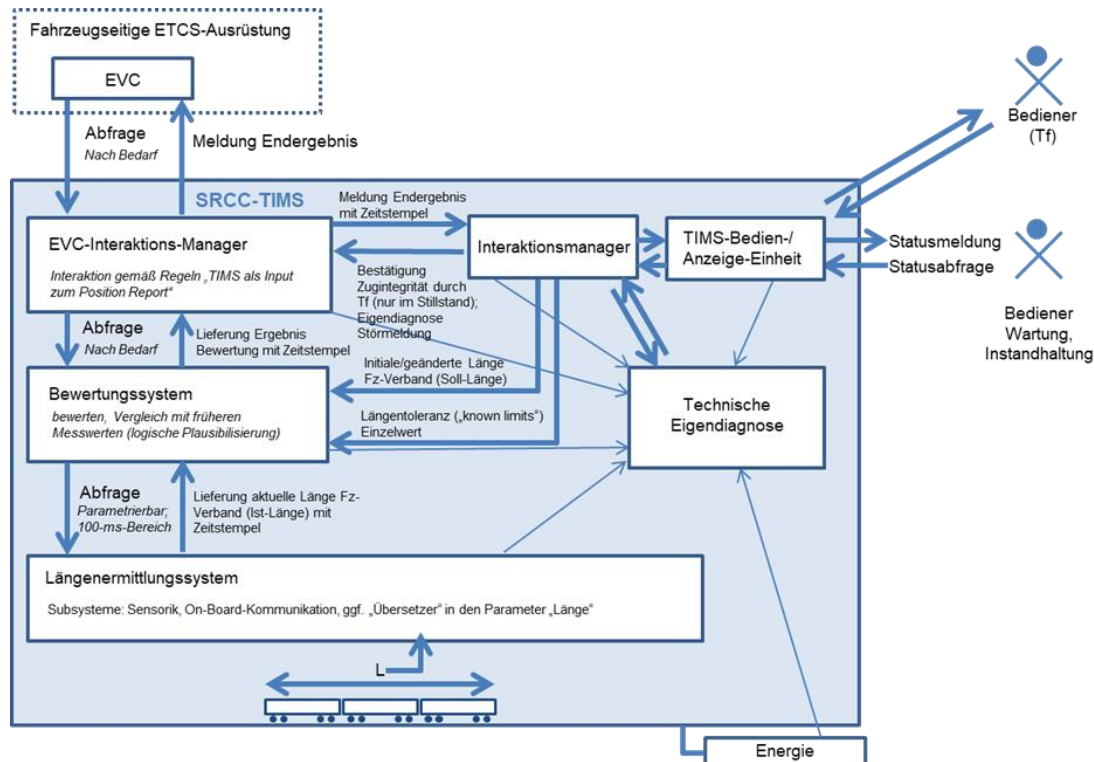


Abb. 4: Innerer Systemaufbau TIMS; Fachkonzept

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 durch CERSS 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 Abb. 5 dargestellt. Es veranschaulicht das Verhalten des Systems bei Informationsaustausch zwischen 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.

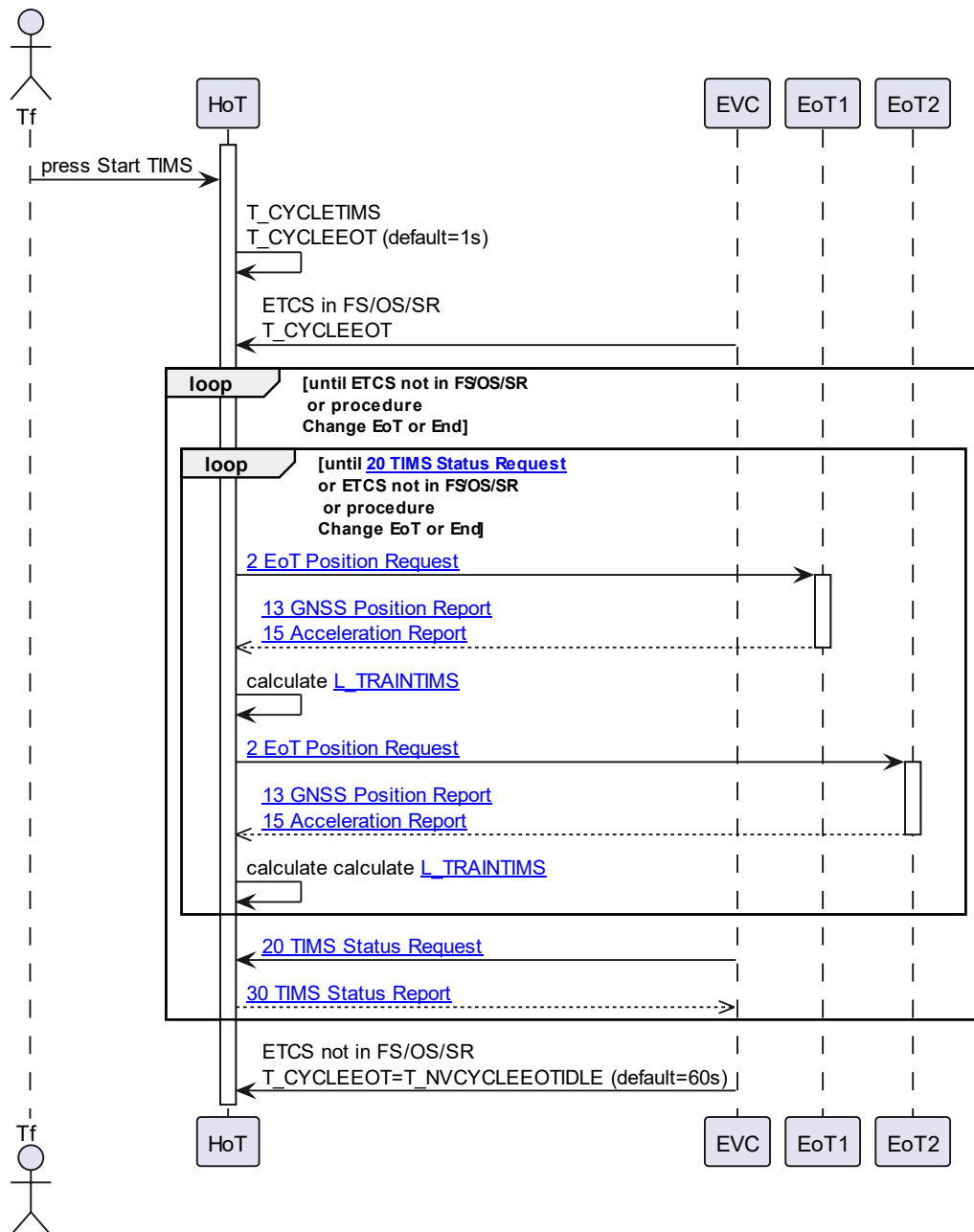


Abb. 5: Beispiel UML-Sequenzdiagramm Fahrtbeginn

2.2.3 Betriebsprozesse und Gefährdungsanalyse

Ein betrieblicher Gesamtprozessablauf wurde abgeleitet und beschrieben. Auf dieser Basis wurde eine Gefährdungs- und Risikoanalyse durchgeführt. Dafür wurden mögliche Fehler aus der Funktion des TIMS heraus beschrieben, in Fehlerbäume eingeordnet, SIL-Einstufungen vorgenommen, mögliche Ursachen und Maßnahmen dagegen ausgearbeitet.

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 Punktvorgabe 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

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

April 2022 – Längenmessung über Empfangsfeldstärke mittels LoRa

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

Das von der LoRa Alliance definierte LoRaWAN nutzt die physikalische Schicht mit großer Reichweite (LoRa), um drahtlose Kommunikation über große Entfernungen mit niedrigen Datenraten und minimalem Stromverbrauch zu ermöglichen. 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- (zwei EoT) und Empfänger-knoten (HoT) ausgetauscht, wobei die RSSI-Werte auf der Empfängerseite geloggt werden. Beide Knoten sind mit einem LoRa-Modul ausgestattet.

Die LoRa-Drahtloskommunikation zwischen EoT und HoT ist ein Kerstück des TIMS-Demonstrators. Dabei wurden folgende Werte per Simulation für verschiedene Trägerfrequenzen berechnet:

- Freiraumdämpfung und Verluste durch Beugung an Hindernissen
- notwendige Übertragungsleistung

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

Zur Messung der Zuglänge werden zwei Knotenpunkte installiert. Ein Knoten, das EoT-Gerät (End-of-Train), befindet sich am letzten Wagen. Der zweite Knoten, das HoT-Gerät (Head-of-Train) befindet sich an der Lokomotive. Das Prinzip des Messaufbaus ist in Abb. 6 dargestellt.

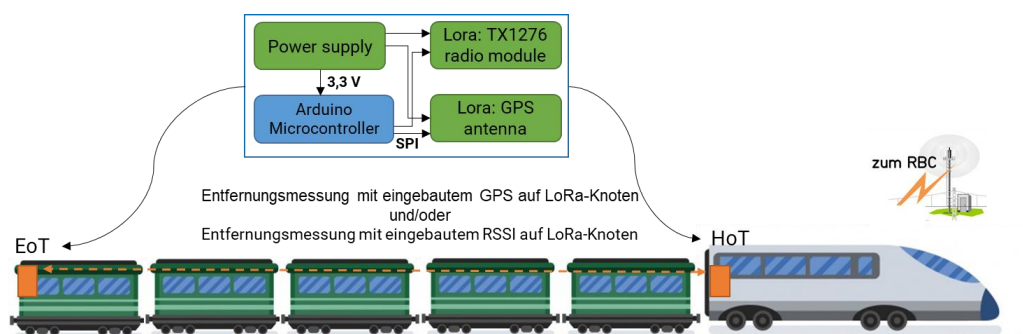


Abb. 6: Abstandsmesssystem Übersicht

In den Voruntersuchungen wurden folgende Sachverhalte in jeweils 100 Messungen je Szenario ermittelt und ausgewertet:

- Ermittlung des Fehlers der Entfernungsmessung in Abhängigkeit der Variation der Zuglänge
- Ermittlung des Fehlers der Entfernungsmessung in Abhängigkeit von der Variation der Höhe von EoT und HoT

Die Tests wurden mit RSSI und LoRa-GPS durchgeführt.

Analyse der drahtlosen Übertragung EoT – HoT

Die Datenübertragung zwischen HoT und EoT wurde hinsichtlich erwarteter Dämpfung, Signalstärke usw. theoretisch analysiert. Dabei weisen HoT und EoT keine Sichtverbindung auf.

Die Einflüsse der frequenzabhängigen Freiraumdämpfung und Abschattungseffekte für die Trägerfrequenzen 169 MHz, 868 MHz, 2,45 GHz und 5,8 GHz konnten abgeschätzt und simuliert

werden. Für die Signalausbreitung wurde die Beugung an Waggonkanten und Reflexion am Boden berücksichtigt. Mit den Ergebnissen konnten die Gesamtdämpfung und grundlegende Anforderungen an Antennen und Sendeleistung definiert 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

Die Messungen wurden im Eisenbahnmuseum von Schwarzenberg, ca. 20 km südlich von Chemnitz, durchgeführt. Das Szenario besteht aus fünf Waggon, die zwischen dem Sender und dem Empfänger platziert sind (siehe Abb. 7).

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 ca. 64 m. Die Messungen wurden für drei Frequenzen durchgeführt: 169 MHz, 868 MHz und 2450 MHz. Für die Frequenzen 169 MHz und 2450 MHz wurden Rundstrahlantennen verwendet, während für 868 MHz Richtantennen mit einer Neigung von 45° zur Oberseite der Wagen verwendet wurden.

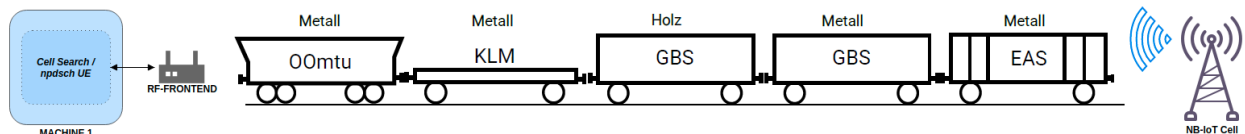


Abb. 7: Generischer Messaufbau (oben) und Panoramabild der Vor-Ort-Messung (unten)

Die Ergebnisse der Messungen bestätigten die theoretischen Berechnungen.

2.3 Arbeitspaket 3: Demonstrator

Im dritten Arbeitspaket wurde der Demonstrator entwickelt. Hierfür wurde zunächst das Lastenheft auf Basis von AP 2 mit konkreten technischen Spezifikationen finalisiert. Grundsätzlich besteht der TIMS-Demonstrator aus einem HoT-Gerät und zwei EoT-Geräten, 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 Messmethoden:

- 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 durch CERSS UML-Diagramme erstellt, um das Zusammenwirken der einzelnen Technologien und den Aufbau verständlich zu machen (Abb. 9). Die Anforderungen an den Demonstrator wurden in einem Lastenheft zusammengefasst (Umgebungsbedingungen, Datenübertragung, Messtechnik, ...). Die technische Komplexität des Demonstrators ist aus Abb. 8 ersichtlich.

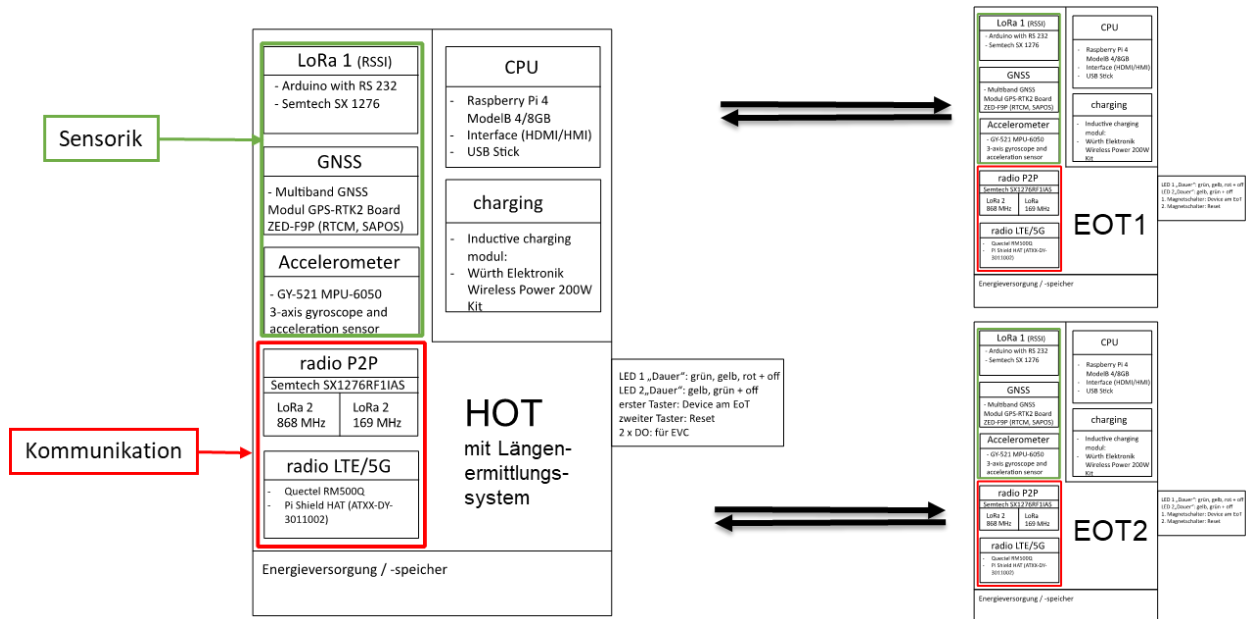


Abb. 8: Demonstrator Hardware Konzept

Bereits ins AP 3 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.

Die Inbetriebnahme der Hardware und der einzelnen Technologien des TIMS-Demonstrators erfolgte bereits iterativ während der Entwicklung. Der erste Test der zentralen Komponenten und ihres Zusammenwirkens fand im April 2023 statt.

Ein TIMS-Knoten (EoT oder HoT) soll alle benötigten Technologien sowie zugehörige Antennen und die Energieversorgung in einem wetter- und stoßfestem Gehäuse aufnehmen. Das gewählte Polycarbonat Gehäuse hat eine Abmessung von 362x254x109 mm und passt somit in die vorgegebene Hüllfläche der Zugschlussscheibe nach TSI an Güterwagen. Die Abb. 10 zeigt einen Blick in einen TIMS-Knoten des Demonstrators. Die Integrationstests erfolgten erstmalig im Juni 2023.

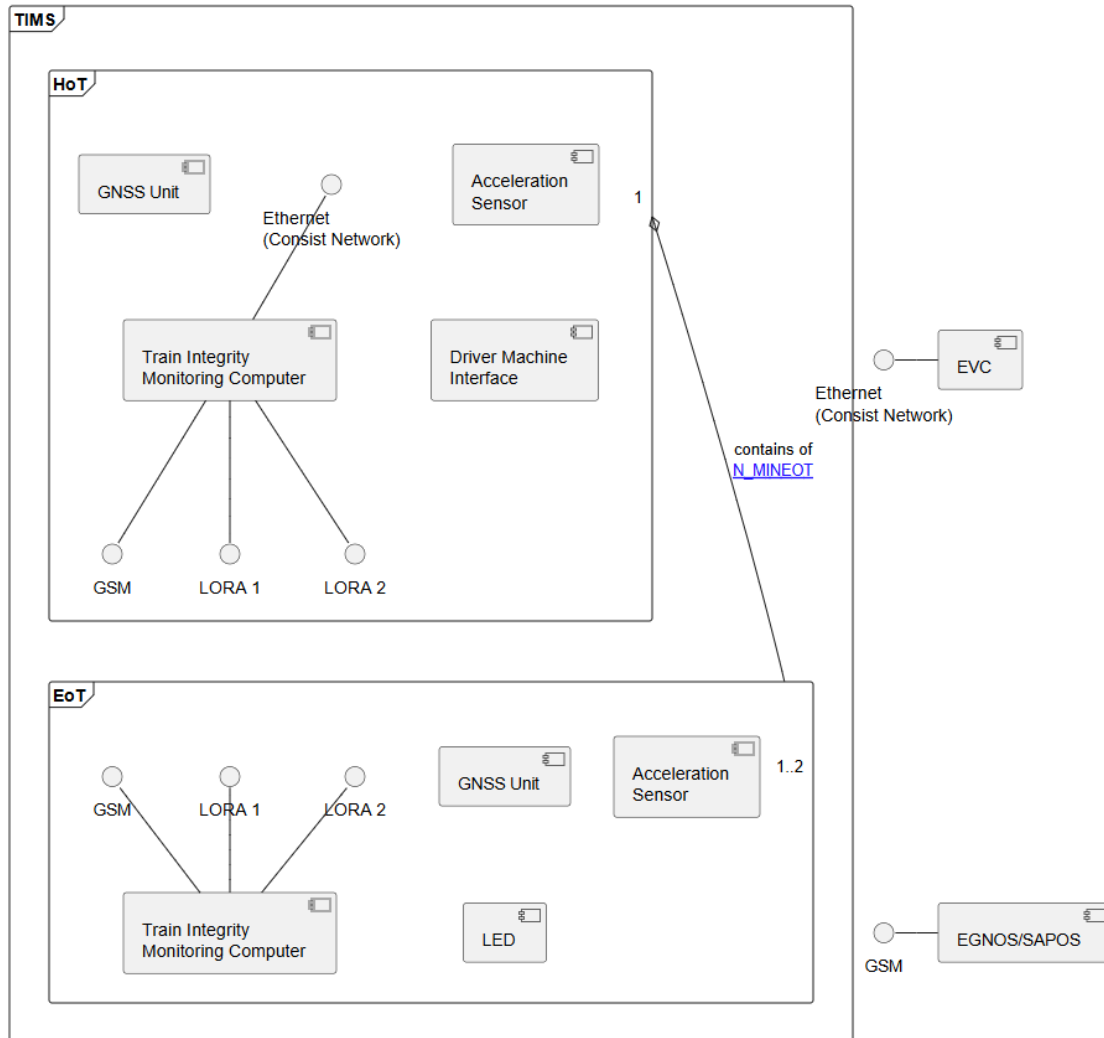


Abb. 9: Prinzipieller Aufbau des TIMS-Demonstrators als UML-Darstellung

Der Demonstrator lässt sich per Taster von außen bedienen. Dabei geben insgesamt drei LED die Funktion und den Status des einzelnen Knotens und des TIMS-Demonstrators wieder. Durch eine kontaktlose Ladeeinheit kann der Akku sicher geladen werden, ohne dass eine Öffnung des Gehäuses notwendig ist. Dies könnte im bahnbetrieblichen Alltag bei entsprechender Ausgestaltung der äußeren Ladeeinheit auch unter widrigen Wetterbedingungen, eventuell sogar direkt am Fahrzeug geschehen.

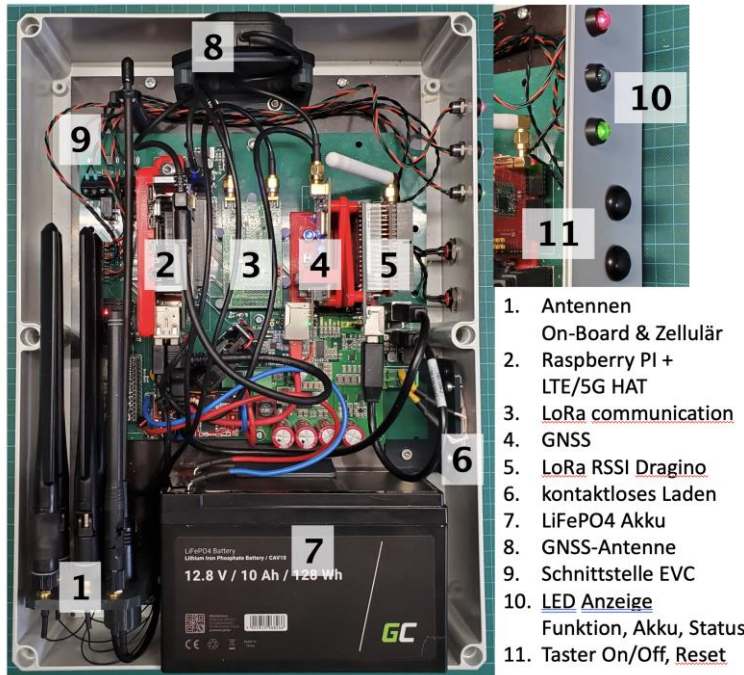


Abb. 10: Bauweise eines TIMS-Knotens

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 Demonstratorentwicklung 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. Vorüberprobungen und Messungen (siehe Abschnitte 2.2.5 und 2.3)
2. Vergleich und Bewertung von Messvarianten
3. Feldversuche statische Funktionstests der Komponenten
4. Feldversuche dynamische Testfahrten DRC (siehe AP 5)
5. Erprobung bei Messfahrt Annaberg – Schwarzenberg (siehe AP 5)

Vorüberprobungen

Viele Tests und Messungen zu den einzelnen Technologien wurden bereits parallel zur Erstellung des Erprobungsprogramms in den AP 2 und 3 durchgeführt. Es wurden viele Messungen vor Ort durchgeführt, um die richtigen Komponenten und Materialien zu identifizieren.

Vergleich und Bewertung von Messvarianten

September 2022 Referenzmessungen mit hochgenauem GNSS

Vor den Messungen in der geplanten Testumgebung des Eisenbahnmuseums Schwarzenberg

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



Abb. 11: GNSS-Referenzmessung Schwarzenberg

März 2023 - Tests LoRa/Antennenvergleich bis 1,2 km

Zur Sicherung der LoRa-Kommunikation erfolgten Untersuchungen der LoRa-Kommunikation in Annaberg unter Berücksichtigung verschiedener Antennen und Entfernungen.

Mai 2023 - GNSS/SAPOS-Messung standalone

Eine der ersten Vorabmessungen auf der realen Eisenbahnstrecke war die alleinstehende GNSS/SAPOS-Messung auf der Strecke zwischen Königswalde und Bärenstein. Hierbei wurden variable Bedingungen hinsichtlich Wetter, Geschwindigkeit und DGNSS berücksichtigt und die Position mittels u-blox F9 high precision GNSS-Modul ermittelt. Dabei kamen erstmals SAPOS-Korrekturdaten zum Einsatz. Die Vorabmessung diente der Verfeinerung der Softwarekonfiguration des Demonstrators in AP 3. Im Ergebnis konnte gezeigt werden, dass durch die Nutzung von SAPOS-Korrekturdaten die mittlere Positionsungenauigkeit der GNSS-Lösung minimiert werden konnte (Abb. 12).

Die mittlere horizontale Genauigkeit der Position des Rovers ist bei Anwendung von SAPOS (HEPS)-Korrektur mehr als 1 m genauer als ohne Korrekturdaten. Gemessen wurde sekundlich bei einer Geschwindigkeit von ca. 10 km/h. Die blaue Linie in zeigt den gleitenden Mittelwert der letzten 16 Messungen. Es wurden an zwei Tagen je 3 Versuche durchgeführt.

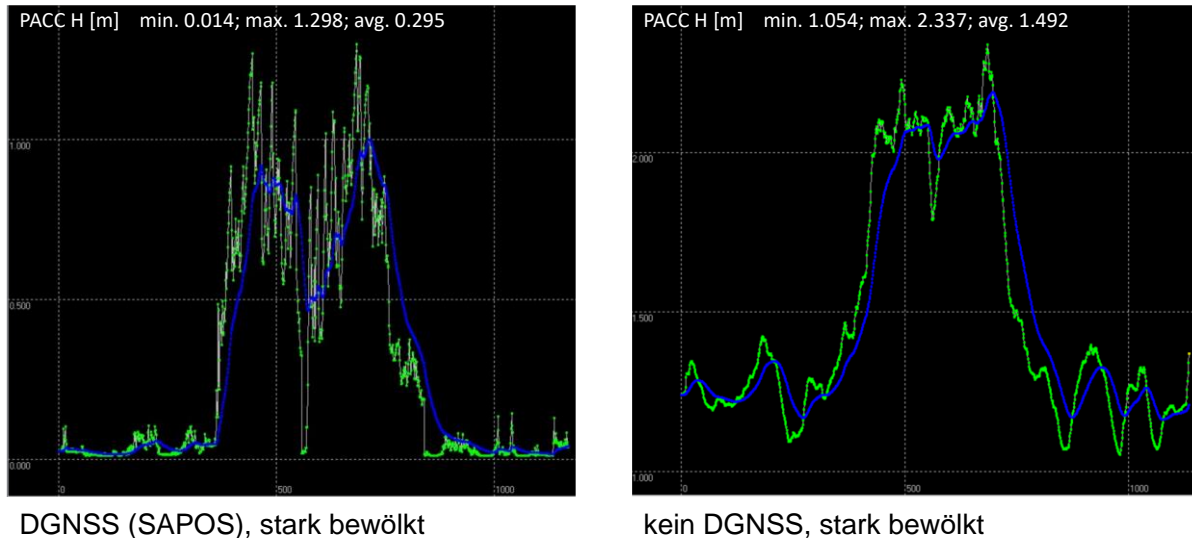


Abb. 12: Ergebnisse Messung mit und ohne SAPOS-Korrekturdaten

Feldversuche statische Funktionstests der Komponenten

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

Juli 2023 – 1. Feldversuch Drehscheibe bis 740m

Bei diesem Versuch erfolgten erstmal Messungen im Realumfeld unter Berücksichtigung von Abschattungen. Bei den statischen Messungen im Eisenbahnmuseum Schwarzenberg wurde ein Waggon auf einer Drehscheibe positioniert und diente als reales Hindernis für die Wellenausbreitung. An diesem wurde ein Teil des Demonstrators als digitale Zugschlussscheibe (= EoT-Modul) angebracht. Der zweite Teil des Demonstrators, wurde schrittweise, entlang der vorab eingemessenen Referenzpunkte vom Waggon entfernt. Dabei wurden eine Kalibrierung des RSSI-0 vorgenommen und ein zentrales Logfile erprobt. Der 1. Feldversuch offenbarte Probleme bei der LoRa-Verbindung und GNSS-Genauigkeitsabweichungen bis 20 m. Es wurde festgestellt, dass es zu starker Zeitverzögerung der Daten kam, die Positionsgenauigkeit der Einzelgeräte aber sehr gut war. Anhand dieser Beobachtung konnten Fehler in der Datenverarbeitung der Geräte behoben werden.

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

Im zweiten Feldversuch wurden Messungen analog zum 1. Feldversuch vorgenommen und alle Daten in einer zentralen Logdatei zur abgelegt (LTE, LoRa, 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. Mit den gewonnenen Werten wurden die weitere Vorgehensweise und der dynamische Aufbau der folgenden Messreihen anhand des Konzeptes bestimmt. Leider konnte auch bis hierhin der Fehler mit der LoRa comm Verbindung noch nicht behoben werden und die Kommunikation der Module lief ausschließlich über die LTE/5G Verbindung. Mit den gewonnenen Werten wurden die weitere Vorgehensweise und der dynamische Aufbau der folgenden Messreihen anhand des Konzeptes bestimmt. Mit diesem Aufbau wurde eine Messung bis ca. 750 m Länge in einer entsprechenden Umgebung möglich. Als Basis für die abgelaufene Strecke diente wieder die Referenzmessung aus dem September 2022 und ist in Abb. 13 zu sehen.

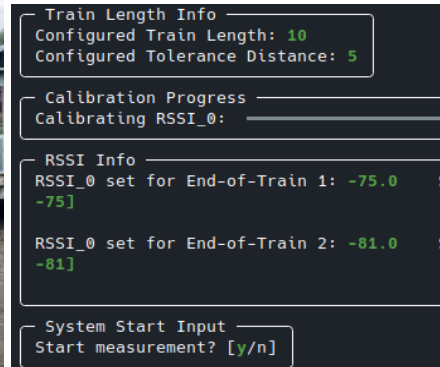


Abb. 13: Feldversuch Drehscheibe

Die Genauigkeiten der Positionen und somit auch der berechneten Zuglängen konnte im Vergleich zum Vorversuch wesentlich verbessert werden. Es wurde gezeigt, dass eine statische Entfernungsmessung mit den GNSS-Messsystem und Übermittlung mittels LTE ohne Probleme bis 740 m möglich ist. Die LoRa-RSSI Messung unterlag hingegen starken Schwankungen, die nicht zuletzt auf den geänderten Ausbreitungsbedingungen bei sich ständig ändernden Abstand zurückzuführen sind. Es bestätigte sich die theoretische Vermutung, dass eine Kalibrierung bei für jeden Messzustand (geänderter Abstand etc.) notwendig ist. In Abb. 13 ist die gemeinsame Änderung der Länge (blau/orange) zu sehen, da sich der HoT simultan zu den beiden EoT entfernt. Die grüne Linie ist die Änderung der Geschwindigkeit des HoT-Knotens. Diese sinkt auf „0“ m/s bei den jeweiligen Messpunkten. Hier wurde jeweils für ca. 30 Sekunden verharret, ehe sich in Schrittgeschwindigkeit zum nächsten Messpunkt bewegt wurde.

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

2.5 Arbeitspaket 5: Erprobung; Begleitforschung

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

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

2.5.1 Feldversuche dynamische Testfahrten DRC

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

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

Für die Versuche wurde ein Testablauf für 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 auf Lokomotive und Wagen die Integrität dieses Zugverbands korrekt gegeben bzw. verloren meldet (Abb. 14). Die Kommunikation untereinander und die Funktion der Messtechnik konnten demonstriert werden.

TIMS Demonstrator Version 1.1					Thu Sep 21 14:50:48 2023				
Status					Evaluation				
Node	Network	5G RSSI	LoRa Comm	Battery	Evaluation	Train Length	Tolerance Distan.	GNSS Distance	Train Integrity
HOT	LTE	-49 dBm	0 dBm	13.3 V	HOT -> EOT	34	10	34.284 m	VALID
EOT	LTE	-55 dBm	0 dBm	13.27 V	HOT -> Z	-	-	114.417 m	-
Z	LTE	-50 dBm	0 dBm	13.32 V					
GNSS Module									
Node	Latitude	Longitude	Speed	Fix Type	Fix applied	Satellites	Horizontal Accuracy	Vertical Accuracy	
HOT	50.554913 °	12.953495 °	0.01 m/s	3D / FLOAT	APPLIED	31	1 cm	2 cm	
EOT	50.555078 °	12.953086 °	0.02 m/s	3D / FIXED	APPLIED	32	1 cm	1 cm	
Z	50.554556 °	12.955009 °	0.0 m/s	3D / FIXED	APPLIED	32	1 cm	1 cm	
RSSI Module			Acceleration Module						
Node	RSSI	Distance	Node	Acceleration X	Acceleration Y	Acceleration Z			
HOT -> EOT	-100 dBm	19.12 m	HOT	0.0 m/s ²	0.0 m/s ²	0.0 m/s ²			
HOT -> Z	-96 dBm	107.52 m	EOT	0.0 m/s ²	0.0 m/s ²	0.0 m/s ²			
			Z	0.0 m/s ²	0.0 m/s ²	0.0 m/s ²			

Abb. 14: Demonstration TIMS-Berechnung auf DRC September 2023

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 Signalstärke, die daraus ermittelte Zuglänge, die ermittelte GNSS-Distanz aus deren Koordinaten, die GNSS-Geschwindigkeit, Werte des Beschleunigungssensors, Batterieladezustand etc.



Abb. 15: 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

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 (siehe Abb. 16), mit einer Länge von 13.55 m, 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. Die Geräte wurden im Bahnhof Annaberg-Buchholz Süd getauscht, da die Rollen vorab fest zugeordnet sind. Ein weiteres Gerät war im Innenraum des Triebwagens aufgestellt.

Dieser Test ermöglichte die dynamische Erprobung mit Einschnitten, Überwaldung entlang der Strecke, sowie Funkzellenwechsel und gibt einen Überblick über den Einfluss der Positionierung der Geräte am/im Fahrzeug und diversen Umgebungsbedingungen. Zudem wurde der Einfluss bei Variation der Geschwindigkeit von Schrittgeschwindigkeit bis max. 40 km/h, sowie im Rangierbetrieb bei weiteren Rangierfahrten im Bahnhof Schlettau untersucht.

Das im Vorfeld erstellte Versuchsprogramm diente als Basis für die Messdurchführung. Grundlage für die abgeleiteten Testschritte waren die detaillierten UML-Abläufe aus der TIMS-Spezifikation (siehe Kapitel 2.2).



Abb. 16: BR 772 mit Demonstrator (EOT 2)

Für die einzelnen Messabschnitte wurden die Geräte nach Messablaufplan neu gestartet und ca. 1 min gewartet, bevor die neue Messung begann. Die SAPOS Korrektur der GNSS-Messungen wurde somit immer sicher angewendet und Genauigkeit der Messungen lag dann immer unterhalb der Toleranzgrenze von 5 m. Die Geräte erstellen damit zudem immer neue Logdateien, was eine spätere Auswertung einfacher macht. Alle Ereignisse, wurden in einem Logbuch festgehalten.

Die Kalibrierung der LoRa-RSSI Messung wurde lediglich vor Fahrtbeginn einmalig am Bahnhof Schwarzenberg durchgeführt und dem Setup dann als Berechnungskonstante für alle weiteren Fahrten zugeordnet. Der Messintervall aller Geräte wurde auf 1/s eingestellt, der Aufnahmeintervall am HoT lag bei ca. 1,5 s. Wie zur DRC (Kapitel 2.5.1) wurde die Fahrt auf einem live Monitor im Fahrzeuginneren über eine SSH-Verbindung übertragen und beobachtet. Die Ereignisse und deren Auswirkung konnten somit besser erkannt und eine erforderliche Reaktion darauf fast zeitgleich ausgeführt werden. Um einen reibungslosen Ablauf zu gewährleisten und so wenig Messausfälle wie möglich zu haben, wurde die Kommunikation ausschließlich über die LTE/5G-Schnittstelle ausgeführt. Die LoRa-comm Verbindung konnte zu diesem Zeitpunkt leider noch immer nicht stabil verwendet werden.

Auch die dabei generierten Messdaten für

- die ermittelte Zuglänge durch die verschiedenen Messsysteme,
- 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 wird sich auf die Auswertung der gewonnen Daten mit dem Demonstrator konzentriert. 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.

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 gewonnen Messdaten ausgewertet und diskutiert. Dabei wird vornehmlich auf das Logfile des HoT-Knoten Bezug genommen. Da der volle Funktionsumfang des Demonstrators zur DRC noch nicht zur Verfügung stand und somit die Auswertung nicht für alle Technologien möglich ist, wird hier ausschließlich die Integrationsermittlung mittels Messsystem aus den GNSS-Daten beschrieben. Zu jeder Zeit der Messungen konnte eine LoRa-RSSI Verbindung erreicht werden, ausgenommen sind Gerätefehler durch Arbeitslast.

In Abb. 17 ist eine kompakte Übersicht der gewonnenen Datenpakete zu sehen. In Zeitabschnitt 1 fanden die Fahrtvorgänge ausschließlich mit gekuppeltem Güterwagen statt. In allen weiteren Abschnitten sind auch Fahrten mit entkuppeltem Güterwagen aufgenommen, aus diesem Grund ist die mittlere Distanz aller Messwerte deutlich größer. Im Folgenden werden die Zeitabschnitte 1 und 3 näher betrachtet.

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

Abb. 17 Übersicht Datenpakete zur DRC

Zeitabschnitt 1

Das Messintervall an beiden Geräten (HoT/EoT1) beträgt 1 s^{-1} und gilt für alle aufgenommenen Werte, nicht nur für GNSS. Das Support-System für die Ortung, „SAPOS“ war permanent aktiv. Das Diagramm in der Abb. 18 zeigt die Geschwindigkeit und die berechnete Zuglänge aus den GNSS-Werten der Geräte. Alle Geschwindigkeiten unter $0,1 \text{ m/s}$ 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 $0,15 \text{ m/s}$ ($0,54 \text{ km/h}$). 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 Positionswerte aller Geräte zum Zeitpunkt X, fortlaufend in das Gesamtlogfile des HoT eingetragen (siehe 2.3). Die Zeitdifferenz dieser Punkte kann abhängig von der Latenz der Datenübertragung, interner Rechenvorgänge und Zeitstempel am HoT bis zu ca. $1,5 \text{ s}$ betragen. Findet in dieser Zeit also eine Positionsänderung des Zugverbandes statt, so können in eine Zeile der Gesamtlogdatei zwei unterschiedliche „alte“ Positionen der Einzelgeräte eingetragen werden.

Werden nun diese Werte fortlaufend für die Berechnung der Länge genutzt, so ergeben sich

Schwankungen im Ergebnis, obwohl die Genauigkeit der Einzelmessung um ein Vielfaches höher ist. Um diesen Effekt, zumindest grafisch entgegenzuwirken, wurde ein gleitender Mittelwert (pink) aus den letzten 10 Messungen dem Diagramm hinzugefügt. Die mittlere Distanz über dem kompletten Zeitabschnitt 1 ist mit 34,25 m berechnet. Wenn man von einem korrekt gemessenen, physischen Abstand der beiden Geräte von 34 m ausgeht, so beträgt die Messabweichung $< 1\%$. 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.

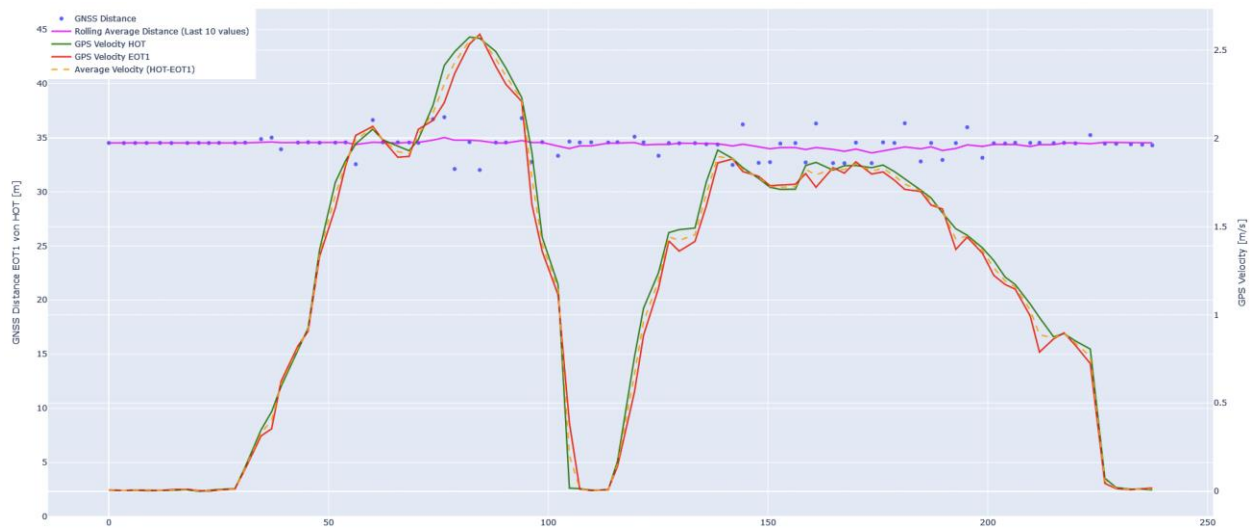


Abb. 18: Zeitabschnitt 1, DRC

Zeitabschnitt 3

Im Zeitabschnitt 3 wurde ein Bereich mit 665 Messpunkten ausgewertet. Die Anteile der verlorengegangenen Pakete (z. T. durch Neustart, u. a.) sind nicht in das Diagramm eingeflossen, jedoch wird die gesamte Zeit erfasst. Das Messsetup ist gleich dem Setup aus Zeitabschnitt 1. Es wurden drei Fahrten mit abgekoppeltem Güterwagen durchgeführt. Die maximalen Abweichungen der Geschwindigkeiten der Geräte, bei gemeinsamer Fahrt, liegen unter ebenfalls unter 0,15 m/s.

Im Bereich von ca. 750 s ist ein Messdatenverlust während eines Fahrtvorganges zu erkennen. 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 Umkehrvorgängen der Lok ebenfalls 0 m/s. Bei den Umkehrvorgängen wurde ein maximaler Abstand von 130 m erkannt. Am Monitor konnten dem Fachpublikum die Live-Werte der Messung gezeigt werden.

Mit einer eingegeben Längentoleranz von 10 m wurde bei Fahrten mit gekuppeltem Güterwagen immer sicher die Integrität des Zugs als vorhanden angezeigt. Bei allen Fahrten mit abgekoppeltem Waggon konnte ebenfalls zuverlässig der Verlust der Integrität detektiert werden. Dies geschah im Mittel bei 44 m, also bei Überschreiten der Zuglänge von 34 m zuzüglich der Längentoleranz von 10 m.

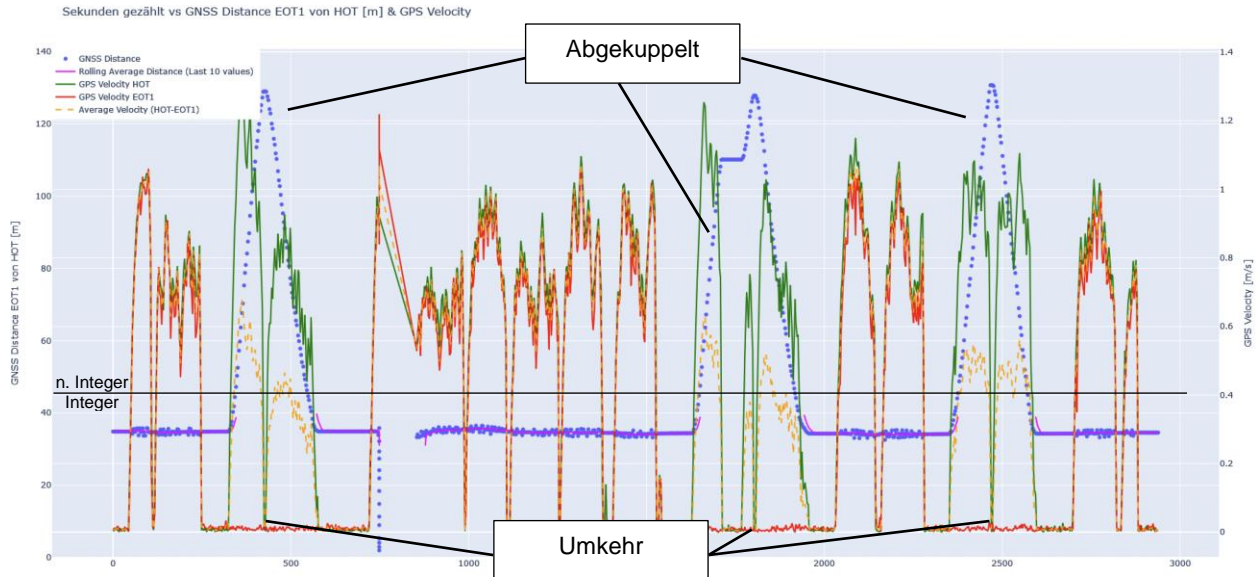


Abb. 19: Zeitabschnitt 3, DRC

Grafische Aufbereitung der Rohdaten

Die GNSS-Rohdaten konnten für jede Einzelmessung aus Zeitabschnitt 1 in einen GPX-Pfad umgewandelt werden und in Openstreetmap visualisiert werden. 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 Zug fortbewegt haben. Die maximale Abweichung der horizontalen GNSS-Genauigkeit lag bei 3,3 cm, die vertikale bei 5,6 cm. In der Abb. 20 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.

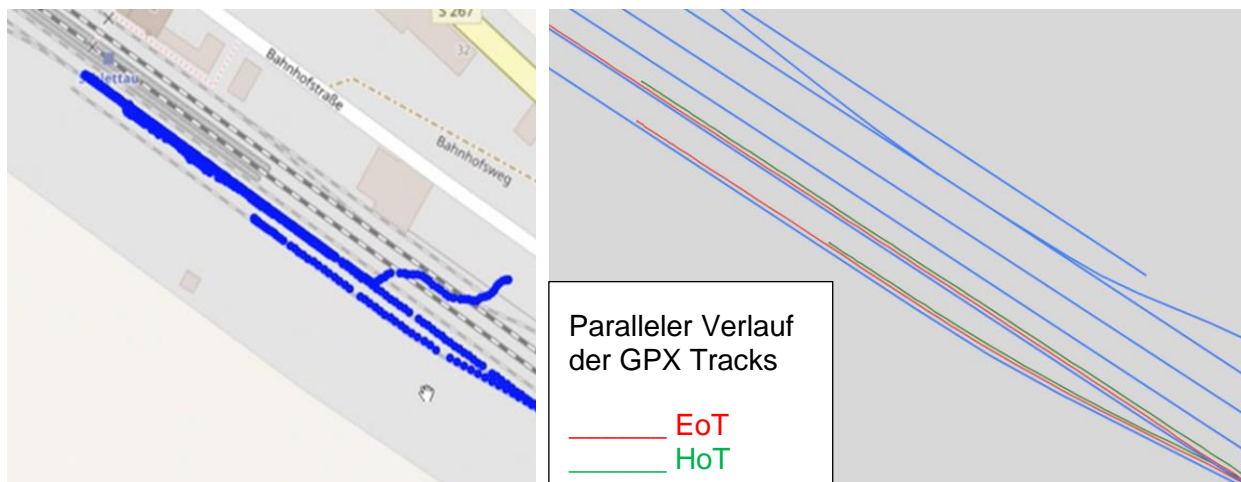


Abb. 20 Einzelmesspunkte, DRC

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.

Die Geräte lieferten gut brauchbare Daten für eine sinnvolle Auswertung, dennoch kam es in

regelmäßigen Abständen zu Unterbrechungen im Messablauf oder zum Abbruch bei der Initialisierung. Eine vollständige Funktion aller Mess- und Kommunikationsanwendungen konnte nie gleichzeitig erreicht werden. Somit wurden für Messungen z. T. Einzelfunktionen abgeschaltet, um so einen flüssigeren Messablauf zu ermöglichen.

2.6.2 Auswertung Messfahrt Dezember 2023

Die Integrationsfeststellung für alle Messungen 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 die Gesamtlogdatei aus dem HoT-Knoten analysiert als auch die Einzellogdateien der EoT. Insgesamt entstanden über 240 Logdateien, welche mit Hilfe von Excel und Mat-Lab ausgewertet wurden.

GNSS - Positionsbestimmung und Genauigkeit

Die Genauigkeit der einzelnen Positionen lässt sich mit einer Wahrscheinlichkeit von mind. 95 % bestimmen (Ublox). Die ausgegebenen Werte aus dem GNSS-Receiver weisen eine horizontale Genauigkeit (PACC H) aus, die für Verortung im Gleis ausreichend ist. Alle Genauigkeiten ≥ 10 m sowie leere Logdatei-Zeilen werden nicht betrachtet, da diese sehr wahrscheinlich von einer Fehlfunktion durch eine hohe Arbeitslast im TIMS-Knoten oder durch Neustart der Geräte hervorgerufen werden.

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

Tabelle 1: GNSS Genauigkeit und Länge in den Fahrtabschnitten



Abb. 21 Ausschnitt GNSS-Genauigkeit aller devices

In der Tabelle 1 ist die berechnete Länge von HoT – EoT 2 und die horizontale Genauigkeit (PACC H) des HoT für alle Messabschnitte mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten dargestellt. In der Abb. 21 lässt sich der Bezug der Position zum Gleis (OpenStreetMap) und die Abweichung darstellen. Es ist eindeutig erkennbar, dass EoT 1 aufgrund der Anbringung im Innenraum des Fahrzeuges eine höhere Abweichung aufweist. Die Auswertung aller Messdaten zeigt hier ein 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. Der PACC H ist geschwindigkeitsabhängig.

Eine fehlende Zeitsynchronisation lässt eine genaue und vor allem reale Längenberechnung nicht zu. Die Hintergründe und das resultierende Verhalten wurden im Abschnitt 2.6.1 erläutert. Auffällig ist die ungenaue Längenberechnung über GNSS, obwohl eine sehr genaue Positionsbestimmung der einzelnen Knoten vorhanden ist. Zur Überprüfung wurden auch in diesem Abschnitt wieder die Einzelmesspunkte aller Messungen nachträglich auf eine Karte eingetragen. In Abb. 22 ist eine Aufzeichnung der Messpunkte in eine OSM Karte zu sehen. EoT 2 und HoT liegen hier sehr genau auf einem Gleis im Bhf. Schlettau. EoT 1 (Im Zug) misst ca. einen halben Gleisabstand daneben. Bei einer Animation der Einzelmesspunkte bewegen sich die Einzelmesspunkte mit gleichem Abstand und exakt parallel zueinander in die Fahrtrichtung des Zuges. Die Unregelmäßigkeiten im linken, oberen Bildbereich sind mit einem Neustart der Geräte zu erklären. Man sieht, wie sich die gemessene auf die tatsächliche Position einschwingt.

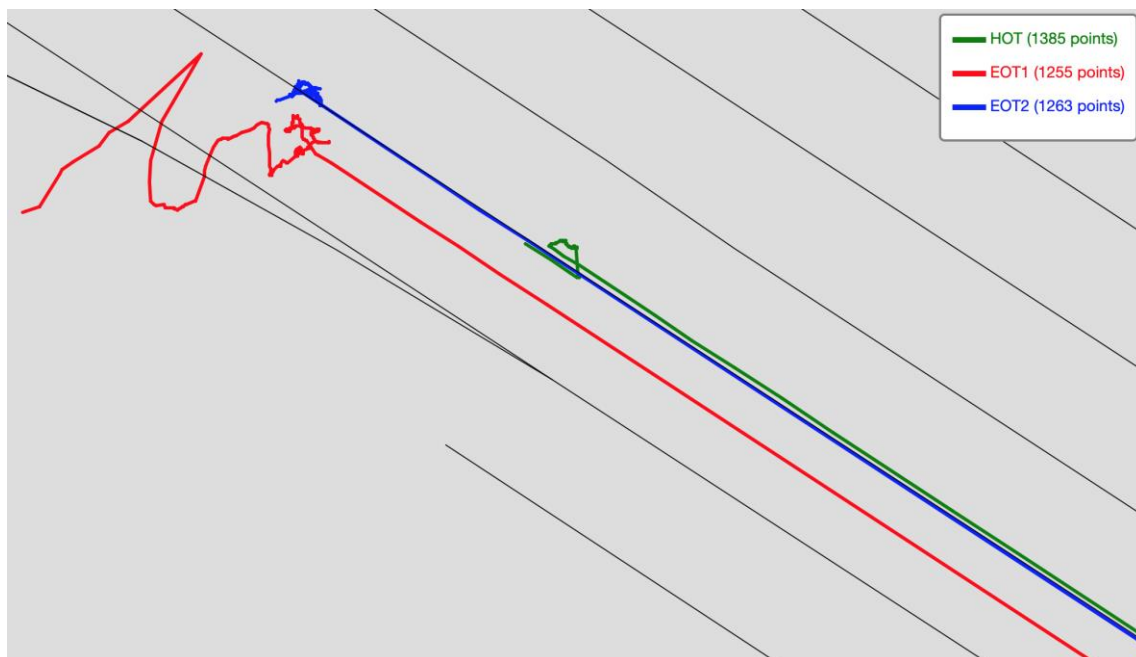


Abb. 22 Einzelmesspunkte Rangierfahrt

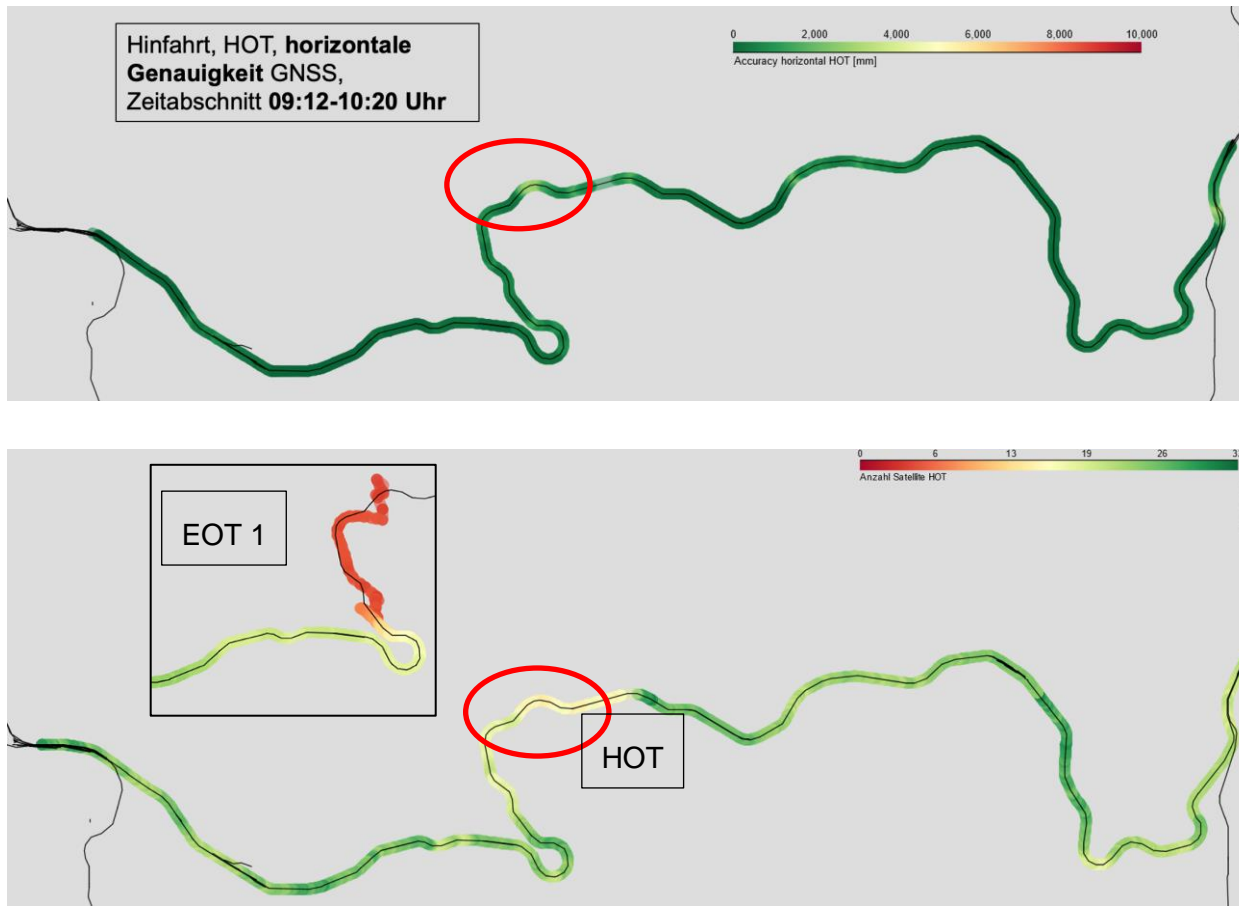


Abb. 23 Zusammenhang der Genauigkeit (oben) und Satellitensichtbarkeit (unten)

Die Genauigkeit der Positionsbestimmung nicht nur von der Geschwindigkeit, sondern auch von der Anzahl der genutzten Satelliten abhängig (Abb. 23). In dem Markierten Bereich, sinkt die Anzahl bis auf 15 Satelliten, wobei es im Mittel 27 bis 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. nur 6 Satelliten sichtbar und auch kurzzeitig keine SAPOS Unterstützung möglich.

Mobilfunkverbindung LTE/5G- RSSI und SINR

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

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

In den Abb. 24 und Abb. 25 werden die RSSI und SINR nur für den HoT gezeigt. Die Darstellung vereint alle an dem Tag aufgenommenen Werte mit dem jeweiligen Positionsbezug aus den GNSS-Werten des HoT. Die Überlagerung der Daten bei mehrmaliger Überfahrt ist hierin nicht zu erkennen. Mit durchschnittlich -62 dBm liegt der RSSI-Wert in einem sehr guten Bereich. Es konnte zu keiner Zeit ein Verbindungsabbruch zu den Basisstationen festgestellt werden.

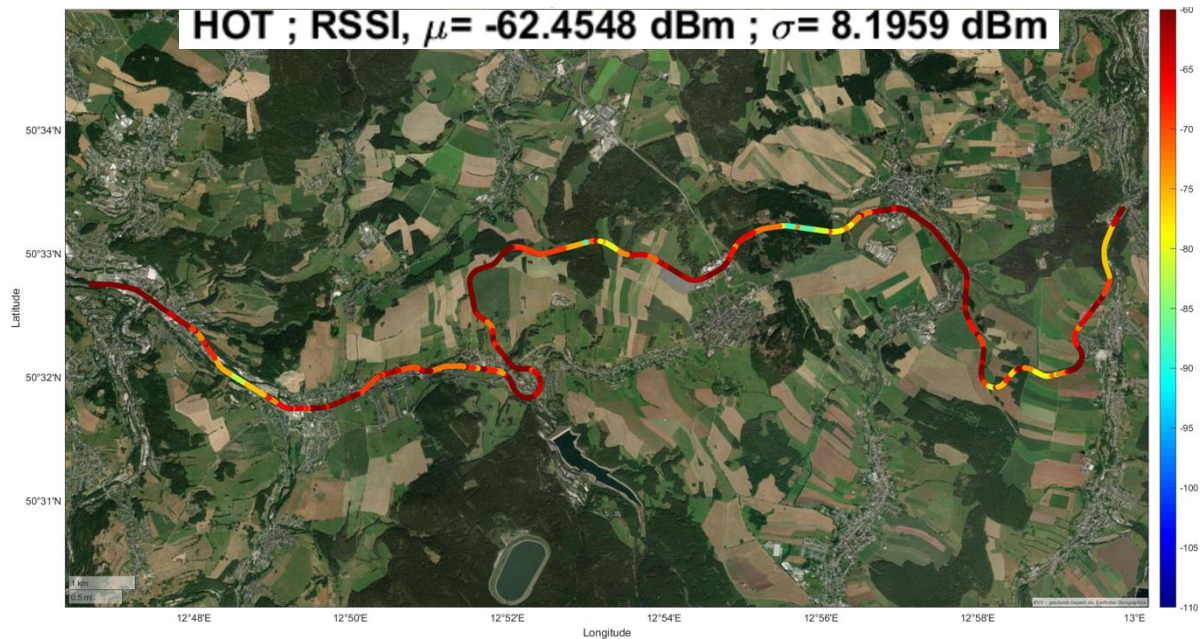


Abb. 24 Empfangsfeldstärke – HOT

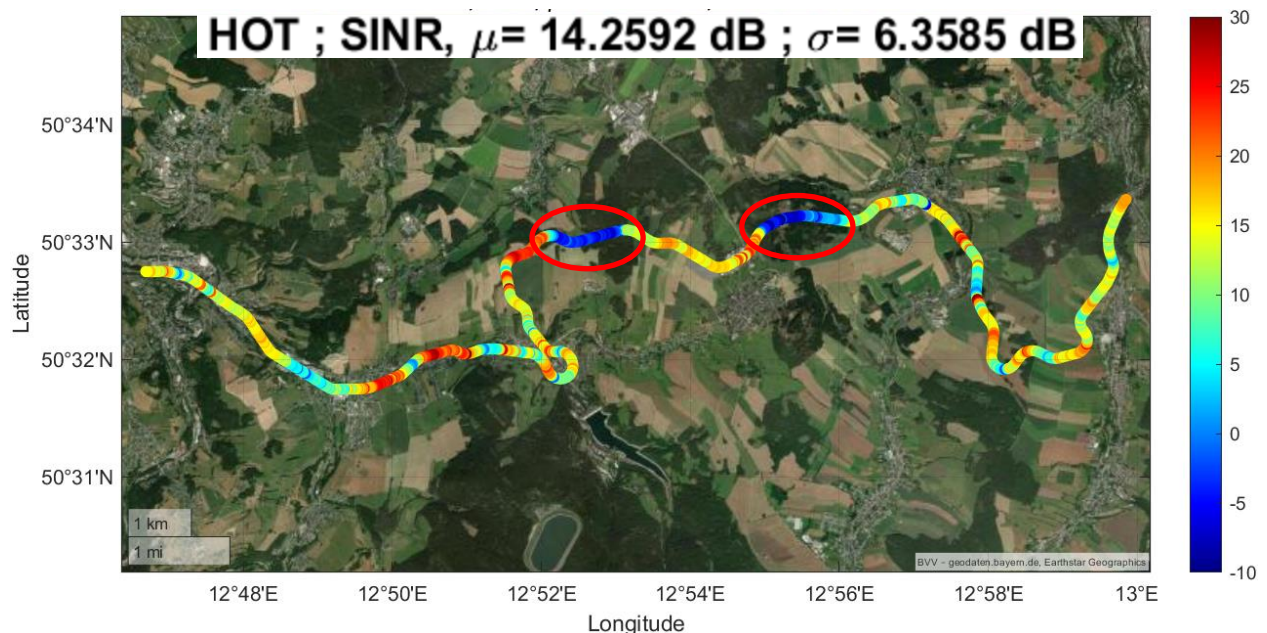


Abb. 25 Signal-Interferenz-Rausch-Signal – HoT

Anders sieht es bei Betrachtung des SINR aus. Dieser Wert kann als qualitative Einschätzung der Mobilfunkverbindung genutzt werden. Er setzt dabei die Leistung des genutzten Signals ins Verhältnis zur Summe der Störsignale + Hintergrundrauschen. Dabei sind Werte oberhalb von 10 dB als ein sehr gutes Signal zu interpretieren. Werte unterhalb von 0 dB führen zur Ein-

schränkung der Datenrate bis hin zum Verbindungsabbruch zwischen den Geräten. In den beiden Markierungen in der Abb. 25 sind die Bereiche gezeigt, bei denen z. T. keine Verbindung zwischen den Geräten möglich war. In der Logdatei ist demnach kein Wert aus den beiden EoT eingetragen. Eine Längenberechnung zu diesen Zeitpunkten über die GNSS-Werte ist dann nicht mehr möglich – folglich erscheint die Meldung „Train Integrity invalid“.

Für 2,63 % aller Messreihen konnten keine Werte über die Mobilfunkverbindung übertragen werden, die auf eine qualitativ schlechte Verbindung dieser zurückzuführen ist. Die maximale Zeitdauer für einen zusammenhängenden Datenverlust, liegt bei 38 sec. Der Zug hat sich in dieser Zeit über eine Strecke von 465,5 m, mit einer Geschwindigkeit von \varnothing 12,3 m/s weiterbewegt. Übertragungsverluste aufgrund von Systemausfall des Demonstrators wurden nicht mit einbezogen. Eindeutig ist der Bezug von Verbindungsabbruch zu den schlechten SINR-Werten. Die Ursache konnte hier nicht weiter untersucht werden. Es ist aber denkbar, dass z. B. die hohe Dichte der Basisstationen in den bewaldeten Bereichen aufgrund der Forschungsinfrastruktur zu Interferenzen des Nutzsignals führen. Die Referenzmessung mit dem Netzwerkscanner 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. Das entspricht dem späteren betrieblichen Vorgehen beim Rangieren und bei Zugfahrten.

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

Tabelle 2: LoRa-RSSI Längenberechnung zu EOT 2 in den Fahrabschnitten

In der Tabelle 2 sind die durchschnittlich berechneten Werte für die RSSI-Längenmessung in den jeweiligen Fahrabschnitten abgebildet. Es wird hier nur auf die Verbindung der Geräte außerhalb des Fahrzeuges 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 Abb. 26 rot eingekreist.

Die Änderungen der Empfangsfeldstärke im Fahrtverlauf ist gut in der Abb. 26 zu erkennen. Auffällig ist, dass die Hinfahrt (oben) z. T. stark andere Werte im Vergleich zur Rückfahrt (unten) liefert. Die Gründe hierfür konnten nicht gefunden werden. Es ist möglich, dass der physische Gerätetausch (Annaberg-Buchholz Süd) einen großen Einfluss hat. Genauere ortsabhängige

Untersuchung zu dieser Thematik konnten hier nicht gemacht werden und würden weitere Messungen mit sich ziehen.



Abb. 26 Empfangsfeldstärke LoRa-RSSI – Hin- und Rückfahrt

3 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Der Abruf der bewilligten Förderung und die Leistungserbringung verzögerte sich durch die Corona-Pandemie. Der hauptsächliche Teil der Leistungen wurde daher zu Projektbeginn und im Jahr 2023 erbracht. Die bewilligte Fördersumme in Höhe von 35.212,84 EUR konnte bereits durch die Eigenmittel im Jahr 2023 vollständig abgerufen werden. Die wichtigsten Zahlen zur Durchführung des Projektes enthält Tabelle 3.

Jahr	Entstandene Kosten [EUR]	Eigenmittel [EUR]	Auszahlung je Jahr [EUR]	Kassenbestand zum 31.12. [EUR]
2021	25.396,39	12.698,19	5.927,99	-6.770,21
2022	14.101,79	7.050,90	6.770,21	-7.050,89
2023	39.044,91	23.581,16	7.050,89	-15.463,75
2024	8.985,81	8.985,81	15.463,75	-

Tabelle 3: Überblick zahlenmäßiger Nachweis CERSS

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 Lösung eines TIMS aufzuzeigen.

Die umfangreich gewonnenen Erfahrung im Umgang mit den TIMS-Geräten und der Messtechnik für diverse Voruntersuchungen können für weitere Projekte genutzt werden. Im speziellen kann die Vielzahl der einzelnen Technologien, die die TIMS-Demonstratoren zur Verfügung stellen, für weitere Kommunikations- und Konnektivitätsanwendungen am SRCC-Campus eingesetzt werden. Die gewonnenen Ergebnisse haben die Kenntnisse von CERSS in dem Bereich der Zugintegritätssysteme und deren Modellierung wesentlich gestärkt. Das ist eine sehr gute Ausgangsbasis für folgende Projekte im Bahnumfeld, bei denen Lösungen zur Zugintegrität begleitet werden sollen.

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 erfolgter Systemzulassung durch den Anwender nach Sektorleitlinie durch ein in der WIR!-Region vertretenes oder noch 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 Fahrzeugumrüstungen 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

Ein weiterer möglicher Ansatz besteht in der Integration der entwickelten Technik für das EoT in eine Art „elektronische Zugschlussscheibe“. Diese kann dann an den jeweils letzten Wagen des Zuges an der bisherigen, genormten Stelle für das Zugschlusssignal am Güterwagen angebracht werden und als EoT-Knoten mit dem HoT zusammenwirken.

6 Verwertungsaktivitäten und Veröffentlichungen

Das Projekt widmet sich mehreren Problemstellungen, die wissenschaftlich weiterverwertet werden. Zum einen wirken Güterwagen durch ihr Material abschirmend. Eine standardmäßige Knoten-zu-Basis-Kommunikation wird dadurch verhindert. Die vergleichsweise einfache Laufzeitmessung bzw. Signalstärkemessung zur Zugintegrität ist so nicht möglich. Wissenschaftlich bedeutsam sind hier die neuen Erkenntnisse zur Ausgestaltung der Antennenkonstruktion zur Behebung der Messeinschränkungen. Bereits veröffentlicht wurden:

- An Experimental Comparison of LoRa versus NB-IoT over Unlicensed Spectrum using Software Defined Radio; 10.1109/EuCNC/6GSummit58263.2023.10188278
- Improving the Reliability of Long-Range Communication against Interference for Non-Line-of-Sight Conditions in Industrial Internet of Things Applications;
<https://doi.org/10.3390/app14020868>

Des Weiteren wurden durch CERSS neue Abläufe zu TIMS-Funktionen und den nötigen Datenpaketen zur Integration mit ETCS mit UML modelliert. Diese Erkenntnisse ergänzen die ETCS-Spezifikationen, die das TIMS nur als externes System betrachten und können als Basis für weitere wissenschaftliche Untersuchungen zur Ausgestaltung von Lastenheften für TIMS sein.

Die Auswertung der Messdaten gibt wichtige wissenschaftliche Hinweise für eine funktionsfähige Ausgestaltung eines TIMS-Prototypen mit Sensoren und Kommunikationsmitteln. Die beobachteten Einschränkungen und Fehler können direkt in die Systemanforderungen einfließen.

Eine Veröffentlichung des Projektes erfolgte bei der DRC vor einem Fachpublikum. Die dort stattgefundenen Versuchsfahrten wurden bereits in der Fachzeitschrift „EI - DER EISEN-BAHNINGENIEUR“ 11/2023 als Kurzmitteilung veröffentlicht.

Eine weitere Veröffentlichung der Projektergebnisse ist in der Zeitschrift SIGNAL + DRAHT für den Zeitraum Oktober 2024 geplant.