

Sachbericht zum Verwendungsnachweis

Teil I – Kurzbericht

WIR!-Projekt: Leckwellenleiter für linienförmige breitbandige Funkversorgung, hochverfügbare Fahrzeugortung und radarähnliche Hinderniserkennung (FKZ 03WIR1220B)

**Zuwendungs-
empfänger: Technische Universität Dresden (TUD)**

Laufzeit: 03/2023 – 09/2025

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Forschung, Technologie
und Raumfahrt

1 Aufgabenstellung

Das übergeordnete Untersuchungsziel des Vorhabens LCX4Rail war die Untersuchung der Anwendbarkeit von Leckkabeln (engl. *Leaky Coaxial Cables*, LCX) zur zuverlässigen Funkversorgung entlang von Schienenverkehrsanlagen. Dabei wurde mit dem Ziel, wirtschaftliche Vorteile durch Einsparung von Hardwarekomponenten zu erzielen, die Umsetzung mehrerer Dienste mit derselben breitbandigen LCX-Infrastruktur untersucht:

1. Funkversorgung für Kommunikation und Datenübertragung
2. Funkbasierte Fahrzeugortung und Sicherstellung der Ortungsintegrität
3. Passive Detektion (engl. *Sensing*) zur Hinderniserkennung

Der Fokus des Aufgabengebiets der TUD lag auf den Ortungsfunktionalitäten, der passiven Objektdetektion mithilfe von Ultra-Breitband-Technologie (engl. *Ultra-wideband*, UWB) und der Verfügbarkeitsanalyse für die untersuchten Datendienste. Im Bereich der LCX-basierten Funkortung befand sich der Forschungsstand zum Zeitpunkt des Starts des Projekts im Bereich von Labortests auf dem Technology Readiness Level (TRL) 4. Ziel war hier die Übertragung in den Realweltkontext und prototypische Testung (TRL 6). UWB-basierte passive Objektdetektion befand sich zu Beginn des Projekts im Bereich grundlegender Untersuchungen (TRL 3) und sollte im Rahmen des Projekts in einem Realweltszenario validiert werden (TRL 5). Dabei sollten entsprechende Verfahren und Algorithmen zur Ortung sowie für das Sensing erarbeitet und zunächst in einer Laborumgebung getestet werden. Anschließend war das Ziel, die Ergebnisse an einer Bahnstrecke mit Messfahrten zu validieren.

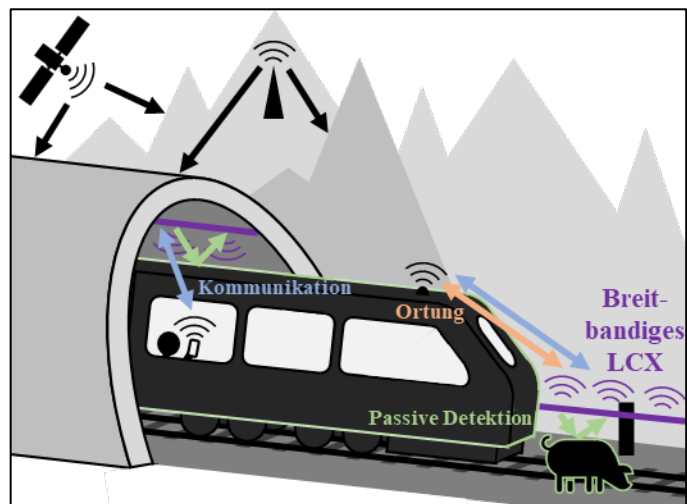


Abbildung 1: Einsatzszenarien LCX

2 Ablauf des Vorhabens

Das Vorhaben gliedert sich in insgesamt sieben Arbeitspakete (AP). Abbildung 2 zeigt ein Gantt-Diagramm der Zeitplanung und Aufgabenverteilung. Die Arbeitspakete mit Beteiligung der TUD sind gelb hervorgehoben. Dabei wurden drei Meilensteine (MS) definiert, die sich in erster Linie am Fortschritt der Verlegung der LCX-Infrastruktur und der Messfahrten am Smart Rail Connectivity Campus (SRCC) in Annaberg-Buchholz orientieren:

- MS 1: Vollständige Verlegung der LCX-Infrastruktur
- MS 2: Kontinuierliche Datenerhebung
- MS 3: Abschluss Langzeitdatenauswertung

Das Projekt wurde unter anderem aufgrund von Personalengpässen, bürokratischen Hindernissen bei Genehmigungsverfahren und Verzögerungen in der Hardwarebeschaffung vom ursprünglichen Ende am 28.02.2025 bis zum 30.09.2025 verlängert.

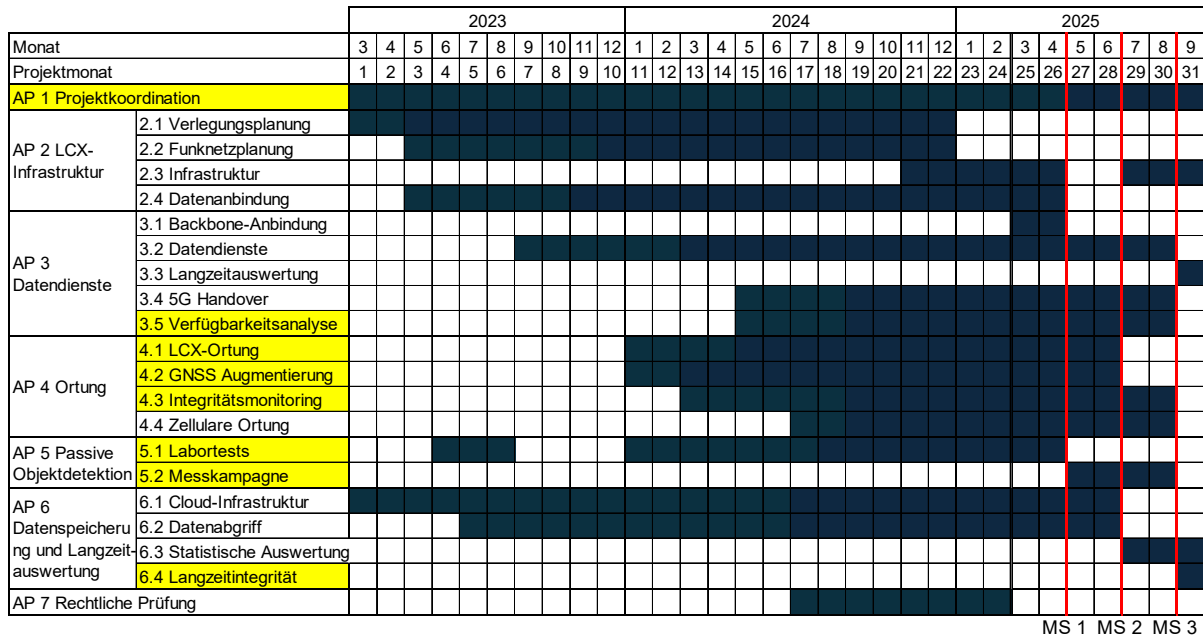


Abbildung 2: Gantt-Diagramm zur Zeit- und Aufgabenplanung

3 Zusammenfassung der wesentlichen Ergebnisse

Im Rahmen des Projekts wurden die Aspekte Funkversorgung für die Kommunikation, Funkortung und Sensing mithilfe von LCX entlang von Schienenverkehrsstrecken untersucht. Für die Funkortung wurden zwei laufzeitbasierte Ortungssysteme, ein UWB-System mit 500 MHz Bandbreite und ein schmalbandiges System im Industrial, Scientific, Medical Band (ISM-Band) bei 2,4 GHz, mit Übertragungen ähnlich Bluetooth Low Energy (BLE), untersucht. Es wurden auf LCX- und Schienenverkehrsanforderungen angepasste Ortungsverfahren erarbeitet und in Software umgesetzt. Im Bereich des LCX-basierten Sensings wurde auf Basis desselben UWB-Systems ein Verfahren zur Objektdetektion entwickelt, das die Kanalimpulsantwort zur Erkennung von Gegenständen und Personen nutzt.

Alle Systeme wurden zunächst statisch getestet und in einer Schienenverkehrsumgebung erprobt. Dazu wurde im Rahmen des Projekts ein LCX-Testfeld auf dem Außengelände einer Schienenfahrzeughalle in Dresden errichtet. Im Anschluss wurden die LCX-Ortungsverfahren sowie ein 5G-Datenübertragungssystem der Technischen Universität Chemnitz (TUC) an einer Schienenverkehrsstrecke des Regelverkehrs untersucht. Dazu wurden in Zusammenarbeit aller Projektpartner eine LCX-Teststrecke an der Bahnlinie am SRCC in Annaberg-Buchholz errichtet und entsprechende Messfahrten durchgeführt. Für das Integritätsmonitoring wurde ein Versuchsaufbau und eine entsprechende Software zur parallelen, dynamischen Lokalisierung mit den für die Funkortung über LCX entwickelten Verfahren, sowie dem Global Navigation Satellite System (GNSS) mit Real Time Kinematic (RTK)-Korrekturdaten und einer Inertial Measurement Unit (IMU) erarbeitet. Die erzielten Ergebnisse belegen eine durchgängige 5G-Funkabdeckung entlang der Teststrecke sowie eine erfolgreiche Funkortung mithilfe des LCX-Ortungssystems.

Abschließend lässt sich festhalten, dass die im Projekt durchgeführten Untersuchungen einen wichtigen Schritt in Richtung einer zunehmend multifunktionalen, kosteneffizienten und sicheren Schienenverkehrsinfrastruktur darstellen. Die gewonnenen Erkenntnisse bilden eine solide Basis für weiterführende Forschungs- und Entwicklungsarbeiten.

Sachbericht zum Verwendungsnachweis

Teil II – Ausführlicher Bericht

WIR!-Projekt: Leckwellenleiter für linienförmige breitbandige Funkversorgung, hochverfügbare Fahrzeugortung und radarähnliche Hinderniserkennung (FKZ 03WIR1220B)

**Zuwendungs-
empfänger: Technische Universität Dresden (TUD)**

Laufzeit: 03/2023 – 09/2025

Gefördert durch:



1 Durchgeführte Arbeiten

Nachfolgend sind die wichtigsten Arbeiten, die von der TUD im Rahmen ihrer Arbeitspakete (AP) ausgeführt wurden, aufgeführt:

- Zuarbeit für das Zentrum für Wissens- und Technologietransfer (ZWT) der Technischen Universität Chemnitz (TUC) im AP 1 Projektkoordination für die Teilaufgaben 1.2 Berichtlegung und 1.3 Verbreitung und wissenschaftliche Kommunikation
- Teilaufgabe 3.5 Verfügbarkeitsanalyse des AP 3 Datendienste
- Teilaufgaben 4.1 Leckkabel (engl. *Leaky Coaxial Cables*, LCX) -Ortung, 4.2 Global Navigation Stellite System (GNSS) -Augmentierung und 4.3 Integritätsmonitoring aus dem AP 4 Ortung
- Teilaufgaben 5.1 Labortests und 5.2 Messkampagne aus dem AP 5 Passive Objektdetektion und Radio Sensing
- Teilaufgabe 6.4 aus dem AP 6 Datenspeicherung und Langzeitauswertung

AP 1: Projektkoordination

Das ZWT übernahm die Hauptbearbeitung des APs, wobei die TUD die abgeforderten Zuarbeiten in Bezug auf Projektfortschritt, Fortschreibung der Projektplanung, Verbreitung und wissenschaftliche Kommunikation lieferte.

AP 1.2: Berichtlegung

Zwischenergebnisse von Relevanz wurden dem Hauptverantwortlichen dieses APs, dem ZWT, zur Verfügung gestellt, um etwa den Beiratsmitgliedern des Programms „Wandel durch Innovation in der Region“ (WIR) den aktuellen Projektstand präsentieren zu können.

Dem ZWT wurden Risiken für einen erfolgreichen Projektabschluss im ursprünglich vorgesehenen Zeitrahmen des Projekts mitgeteilt. In diesem Zusammenhang wurde, unter anderem bedingt durch Verzögerungen bei der Verlegung der LCX und durch Schwierigkeiten bei der Rekrutierung neuer Mitarbeiter an der TUD, eine Projektverlängerung beantragt, siehe auch Abschnitt I-2 des Schlussberichts.

AP 1.3: Verbreitung und wissenschaftliche Kommunikation

Lehrinhalte zu LCX wurden im Rahmen des Projekts vor allem in der Vorlesung „Entwurf und Betrieb virtueller Mobilitätssysteme“ integriert. Zudem fand das Projekt in Lehrveranstaltungen als Praxisbeispiel Verwendung, unter anderem in der Lehrveranstaltung „Theorie und Technik der Informationssysteme“.

Im Zusammenhang mit der Thematik des Projekts wurde ein Promotionsvorhaben zum Thema LCX gestartet und es wurden mehrere studentische Arbeiten betreut:

- Studienarbeit zum Thema „Systematisierung von Möglichkeiten und Grenzen des Radio Sensing zur Hinderniserkennung für Verkehrsanwendungen“
- Masterarbeit zum Thema „Evaluierung des Einsatzes von breitbandigen Ortungstechnologien zur sparselektiven Ortung von Schienenfahrzeugen“
- Diplomarbeit zum Thema „Untersuchungen zum Einsatz von funkbasierter Zugortung mit Leckwellenleitern (LCX) entlang von Schienenverkehrswegen“

- Diplomarbeit zum Thema „Evaluation des Einsatzes von Radio Sensing zur Detektion von Hindernissen entlang von Verkehrswegen“

Das Projekt wurde auf der Webseite des Lehrstuhls für Informationstechnik für Verkehrssysteme (ITVS) an der TUD (<https://tu-dresden.de/bu/verkehr/vis/itvs>) sowohl in den Kategorien „News“ als auch „Forschungsprojekte“ erwähnt. Zu den im Projekt veröffentlichten Arbeiten siehe Kapitel 6.

In der wissenschaftlichen Kommunikation ist auch der im Projekt zusammen mit der MRK Media AG (MRK) entwickelte LCX-Ortungsdemonstrator hervorzuheben. An der TUD wird er unter anderem bei Veranstaltungen zur Präsentation von Forschungsaktivitäten verwendet. Der Demonstrator stellt anhand eines 3 m langen LCX den unter AP 4 beschriebenen Laborversuchsaufbau für die LCX-Ortung dar, wobei die Distanz-Messdaten am Anker abgegriffen werden. Der Demonstrator wurde um einen aufgeständerten Kabelkanal ergänzt, wie er entlang von Bahnstrecken verwendet wird. Des Weiteren wurde der Tag auf einem Modellzug angebracht, der beim Betrieb des Demonstrators auf einem Tisch mit Modellbahngleisen entlang des LCX fährt. Dieser Versuchsaufbau ist in Abbildung 1 dargestellt. Ein Laptop, auf dem die im Rahmen des Projekts entwickelte Ortungssoftware läuft, ist mit dem Tag verbunden. Er zeigt in einem Diagramm die aktuelle Position des Zuges an, siehe Abbildung 2. Die TUD hatte dabei die Aufgabe, Tag, Anker, Messsoftware und GUI bereitzustellen sowie den Demonstrator zu kalibrieren und zu testen.

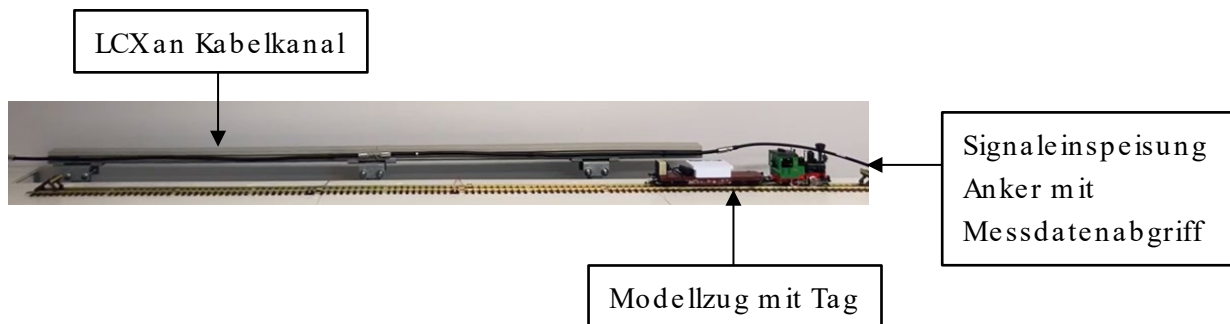


Abbildung 1: Aufbau LCX-Demonstrator

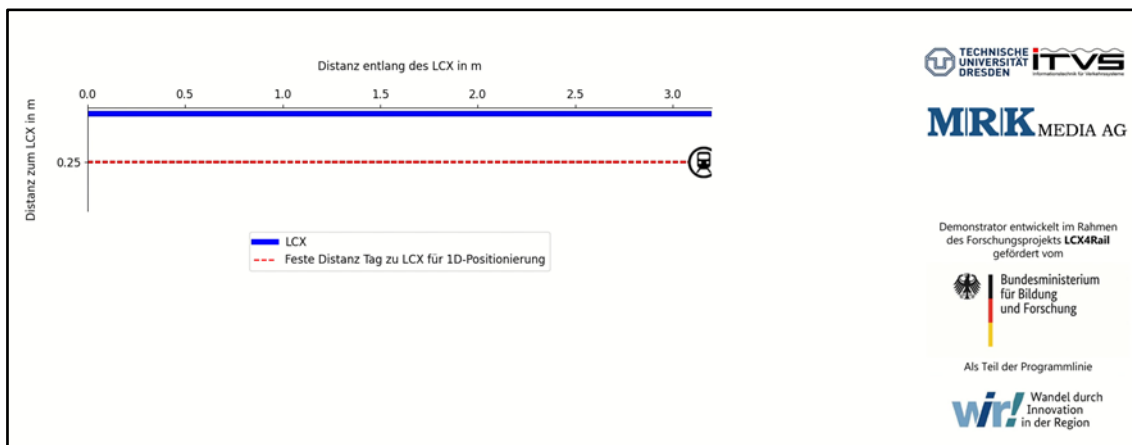


Abbildung 2: GUI LCX-Demonstrator

AP 3.5: Verfügbarkeitsanalyse für Datendienste

Dieser AP hat zum Ziel, die räumliche Verfügbarkeit der Datendienste für Kommunikations- und Multimediaanwendungen im Fahrzeug durch Simulationen und Realwelttests zu analysieren.

Zur Untersuchung der Datendienste bei der Übertragung mit LCX hat die TUC zwei Versuchsanordnungen entwickelt. Mit einem USRP wird an einer Seite des Gleises eine 5G-BS simuliert. Zur Messung der Empfangsqualität von 5G in einem Campus-Netzwerk im Frequenzbereich von 3,7 bis 3,8 GHz werden die folgenden Geräte verwendet, abhängig vom Versuchsaufbau:

- TSMA und Tablet mit QualiPoc der Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG:
Mit dieser Variante können viele Parameter erfasst werden, die zur Beurteilung der Empfangsqualität im Zug herangezogen werden können. Allerdings besteht der Nachteil darin, dass es nur schwer möglich ist, eine automatisierte Weiterleitung der Messdaten an andere externe Geräte einzurichten.
- Router auf Basis eines 5G-Moduls der Quectel Wireless Solutions Co., Ltd:
Bei dieser Variante werden weniger Qualitätsparameter erfasst. Es ist jedoch möglich, besonders bedeutende Parameter wie die Reference Signal Received Power (RSRP) und das Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio (SINR) zu erfassen. Diese Variante hat den Vorteil, dass ein externer Datenabgriff leichter möglich ist und sie sich daher besser für eine zentrale Sammlung der Messdaten eignet.

Bei der Umsetzung der räumlichen Verfügbarkeitsanalyse war es entscheidend, sicherzustellen, dass neben den Qualitätsparametern auch eine Referenzposition erfasst wird. Der Versuchsaufbau mit dem TSMA wurde gewählt, da er die Möglichkeit zur automatisierten Hinterlegung einer GNSS-Referenzposition zu den Messergebnissen bietet.

Im Rahmen des AP 2.2 wurde von MRK eine Simulation des RSRP für 5G entlang der Teststrecke in Annaberg-Buchholz erstellt, um die Verlegung des LCX zu planen. Danach wurde das LCX am SRCC an der Teststrecke installiert. Die TUC führte Messungen im Rahmen von Messfahrten an der Teststrecke mit dem zuvor beschriebenen Versuchsaufbau durch. Siehe AP 6 für weitere Einzelheiten zur Ausführung der Messfahrten und zur LCX-Verlegung. Die folgende Analyse der Verfügbarkeit basiert auf den Ergebnissen dieser Simulation und Messfahrten anhand des RSRP, ein Messwert zur Beurteilung der empfangenen Signalstärke. Es ist zu berücksichtigen, dass die Empfangsqualität nicht nur von der Empfangsleistung abhängt. Auch Rauschen und Interferenzen im Funkkanal stellen beispielsweise weitere Einflüsse dar, die die Empfangsqualität beeinträchtigen können.

Zur Einschätzung der Empfangsqualität dienen Informationen von der TUC zur Bewertung der RSRP-Werte im Zusammenhang mit 5G-Mobilfunknetzen. Werte über -80 dBm zeigen einen hervorragenden Empfang an, während Werte bis -90 dBm auf einen guten Empfang hinweisen. Mit wachsendem Abstand vom Zentrum einer Funkzelle sind Werte von bis zu -100 dBm möglich. Wenn der Wert unter -100 dBm liegt, ist dies ein Hinweis auf einen sehr schlechten Empfang und Verbindungsabbrüche.

In Abbildung 3a) ist ein Foto der Teststrecke zu sehen und in Abbildung 3b) wird das Modell dargestellt, das von MRK für die Simulation der Umgebung der Teststrecke erstellt wurde. Abbildung 3c) und Abbildung 3d) zeigen die erzielten Simulationsergebnisse unter den folgenden Rahmenbedingungen:

- Einspeisung des Signals in das LCX mit 30 dBm
- Position der Antenne am Zug etwa 1,5 m über dem Boden, weitere Eigenschaften der Antenne und des Endgeräts am Zug, wie z.B. der Antennengewinn, werden nicht berücksichtigt
- Statische Position des Zugs innerhalb des Tunnels
- Bei der Verlegung wurde die LCX-Position an die lokalen Gegebenheiten an der Strecke angepasst, sodass sie nur grob der simulierten Position entspricht

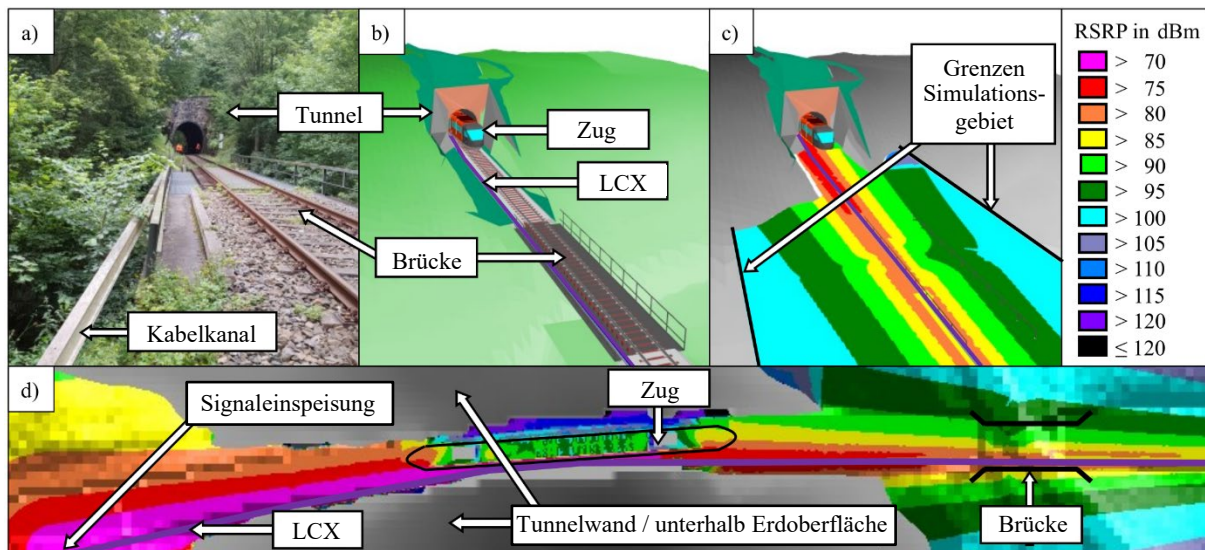


Abbildung 3: Übersicht Teststrecke am SRCC: a) Foto, b) Modell für Funkausbreitungssimulation, c) 3D und d) Vogelperspektive der Simulationsergebnisse für den RSRP mit 5G auf Grundlage von durch MRK bereitgestellten Bildern [Quelle Digitales Geländemodell (DGM): GeoSN, Lizenz: dl-de/by-2-0 (<https://www.govdata.de/dl-de/by-2-0>)]

Die Ergebnisse der Simulation in Abbildung 3 zeigen, dass unter den genannten Voraussetzungen entlang der gesamten LCX ein guter Empfang zu erwarten ist, solange nicht beispielsweise durch Kabeldämpfungen weitere Dämpfungen im System auftreten. Auch bei einer Sendeleistung von 20 dBm ändert sich an dieser Erwartungshaltung nichts. 20 dBm entsprechen dabei der Sendeleistung für 5G, ab der keine Gefährdung für Mensch und Umwelt mehr vermutet werden muss.¹ Für 5G-BS sind allerdings auch höher Sendeleistungen bsp. von 30 dBm wie im Beispiel möglich.

Abbildung 4 zeigt positionsbezogene Ergebnisse für den RSRP, die an der SRCC-Teststrecke im Rahmen der Messfahrten erzielt wurden. Die Auswirkungen der Zuleitungen und Messtechnik (Kabeldämpfungen etc.) wurden herausgerechnet, um sie mit den Simulationsergebnissen vergleichen zu können. Zudem wurde anstelle der am Messtag verwendeten Speiseleistung von 8 dBm, die unter typischen Sendeleistungen von 5G-BS liegt, für die Darstellung auf eine Speiseleistung von 20 dBm hochgerechnet. Die Geodaten zum Verlauf des Deutsche Bahn (DB)-Streckennetzes (breite gestrichelte Linie) sowie die Position von Tunnel und Brücke dienen als Referenz für die LCX-Position. Als LCX-Start wird das Ende des LCX bezeichnet, in das das Signal eingespeist wird. Abbildung 5 zeigt den in Abbildung 4 dargestellten Verlauf des RSRP über die Zeit für die Messfahrt.

¹ Bundesministerium für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz und nukleare Sicherheit, „Welche Grenzwerte, Rahmenbedingungen und Verfahren sind bei der Errichtung und beim Betrieb von 5G-Sendeanlagen einzuhalten?“, <https://www.bundesumweltministerium.de/faq/welche-grenzwerte-rahmenbedingungen-und-verfahren-sind-bei-der-errichtung-und-beim-betrieb-von-5g-sendeanlagen-einzuhalten> (abgerufen am 19.03.2026).

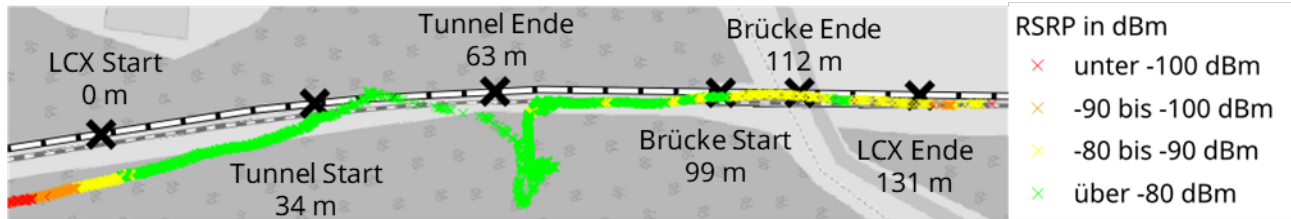


Abbildung 4: RSRP-Messergebnisse an der Teststrecke in Annaberg-Buchholz hochgerechnet auf 20 dBm Einspeiseleistung in das LCX mit Position auf Basis von der TUC bereitgestellten Messdaten. [Quelle XYZ-Geodaten für Hintergrundkarte: OpenStreetMap-Beitragende, ODbL, <https://www.openstreetmap.org/copyright>]; Quelle GPKG-Geodaten Schienennetz DB: Metropolregion Rhein-Neckar, CC BY 4.0, <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>]

Bei der Betrachtung von Abbildung 4, wird zunächst deutlich, dass die erfassten GNSS-Positionsdaten, vor allem im Bereich des Tunnelendes, teilweise erheblich von einem parallelen Verlauf zur Bahnstrecke abweichen. Dies kann auf den schlechten GNSS-Empfang im Tunnel sowie durch die waldige und hügelige Umgebung zurückgeführt werden. Die Positionierung ist jedoch präzise genug, um zu erkennen, dass unter den gegebenen Voraussetzungen entlang des gesamten LCX ein guter Empfang zu erwarten ist.

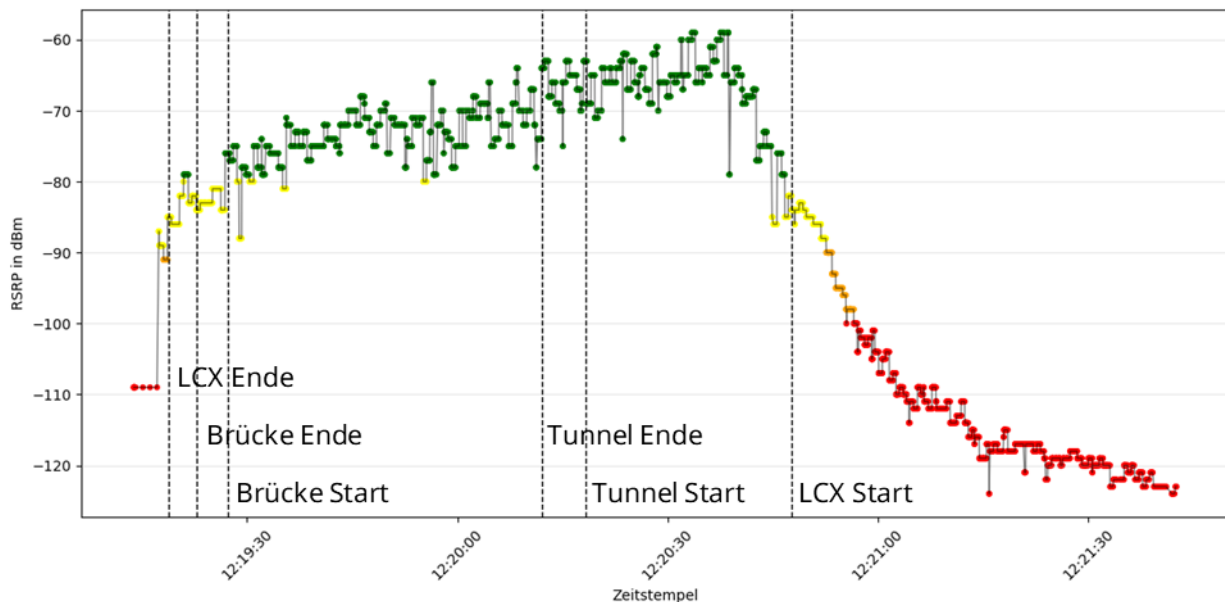


Abbildung 5: RSRP-Messergebnisse an der Teststrecke in Annaberg-Buchholz hochgerechnet auf 20 dBm Einspeiseleistung im Zeitverlauf auf Basis von der TUC bereitgestellten Messdaten.

Abbildung 5 zeigt, dass die Empfangsleistung mit dem Start des LCX nicht ihren Höhepunkt erreicht. Einerseits kann dies an der Ungenauigkeit der verwendeten Geodaten zur Bestimmung des LCX-Beginns liegen. Andererseits kann dieser Effekt auch durch die Richtcharakteristik des LCX verursacht werden. Die entlang des LCX gemessenen RSRP-Werte schwanken zwischen zeitlich aufeinanderfolgenden Messwerten im Bereich bis zu über 10 dB, zeigen jedoch einen insgesamt abfallenden Trend mit zunehmender Distanz entlang des LCX. Es handelt sich um einen erwartbaren Verlauf der Empfangsleistung, die bei LCX typischerweise durch die Überlagerung der Signale aus den einzelnen Schlitzen schwankt, aber im Trend aufgrund der Längsdämpfung abnimmt.

Bei Betrachtung der Werte ist zu beachten, dass das LCX, abhängig vom Verlauf des Kabelkanals, nicht immer auf der gleichen Höhe und in der gleichen Distanz zum Gleis

befestigt ist. Von der Startstelle bis zum Tunnel und von der Brücke bis zum Ende verläuft es auf etwa 30 cm über dem Boden, während es im übrigen Bereich etwa 80 cm hoch ist. Die horizontalen Abstände zwischen LCX und Gleis variieren von etwa 1,3 m bis 1,8 m. Im Tunnel liegt das LCX jedoch wesentlich näher am Zug. Dies kann ein weiterer Grund dafür sein, dass entlang des LCX keine lineare Abnahme der Empfangsleistung gemessen wurde, wie sie allein aufgrund der Längsdämpfung im LCX zu erwarten wäre. Im Bereich der Brücke verläuft das LCX hinter dem Brückengeländer, was zu geringeren Empfangsleistungen beitragen kann. Zusätzlich geht aus den Messdaten hervor, dass das Messfahrzeug im Bereich der Brücke vergleichsweise schnell gefahren ist, und dadurch weniger Messwerte erfasst wurden. Die vergleichsweise hohe Geschwindigkeit kann auch ein Grund für den abrupten Abfall des RSRP vor dem Ende des LCX im Gegensatz zum Bereich vor dem Start des LCX sein. Betrachtet man den Verlauf des RSRP vor Beginn der Brücke, so ist es möglich, dass bei der Ausrüstung eines längeren Gleisabschnitts mit LCX auch längere LCX-Einspeiseabschnitte als die hier umgesetzten 130 m machbar sind, abhängig von den Dämpfungen, Sendeleistungen und Sensitivitäten des realisierten Systems.

AP 4: Ortung

Das AP 4 befasst sich in Abgrenzung zum AP 5 zur passiven Objektdetektion bzw. zum Radio Sensing mit Verfahren zur Positionierung, die Funktechnik sowohl auf Strecken- als auch auf Zugseite erfordern. Untersucht wird ein Verfahren für die 1D-Positionierung entlang des Streckenverlaufs, bei dem die Position auf dem Zug abgerufen werden kann.

AP 4.1: LCX-Ortung

Im Berichtszeitraum wurde die Funkortung mit den folgenden zwei auf IEEE 802.15.4 aufbauenden Ortungssystemen näher untersucht:

- EVK 1000 der Decawave Ltd für UWB-Ortung (UWB-Kit) im Kanal 1 bei 3,5 GHz und Kanal 5 bei 6,5 GHz mit Bandbreite 500 MHz
- DMK-215 der Metirionic GmbH für Übertragungen im Industrial, Scientific and Medical (ISM) Band zwischen 2,4 und 2,5 GHz und einem auf die Kompatibilität mit BLE ausgelegten Ortungs-Ansatz (BLE-Kit)

Bei beiden Systemen wird die Laufzeit des Signals zwischen zwei Transceivern gemessen. Dabei kommen Roundtrip- bzw. Two-Way-Ranging-Verfahren zum Einsatz. Hier erfolgen die Laufzeitmessungen auf Basis von Übertragungen in beide Richtungen zwischen den Transceivern, sodass keine zeitliche Synchronisation der Transceiver notwendig ist.

Für die Zugortung mit LCX wird ein Transceiver am LCX angeschlossen (ortsfest, Anker, kurz Anc) und ein anderer Transceiver am Zug angebracht (mobil, Tag). Anhand der gemessenen Laufzeit des Signals zwischen Tag und Anker kann bei bekannter Ausbreitungsgeschwindigkeit und bekanntem Pfad, über den das Signal am Empfänger detektiert wurde, die Distanz zwischen Tag und Anker bestimmt werden. Bei LCX gibt es hier Besonderheiten im Vergleich zu anderen Antennen, da das Signal an unterschiedlichen Stellen aus dem LCX auskoppeln kann. Außerdem muss der Verkürzungsfaktor des LCX zur Ermittlung der Ausbreitungsgeschwindigkeit des Signals im LCX berücksichtigt werden. Bei den Modellen im Projekt wird davon ausgegangen, dass zwischen dem LCX und dem Tag am Zug Line of Sight (LOS) besteht. Damit besteht der Pfad zwischen dem LCX-Ende mit

Signaleinspeisung und Tag aus zwei Bestandteilen, einer Distanz d_{LCX} , die im LCX zurückgelegt wird, und einer Distanz d_{Luft} über die Luft nach dem Auskoppeln bzw. vor dem Einkoppeln des Signals. Eine Übersicht über das Modell des Signalpfads ist in Abbildung 6 dargestellt.

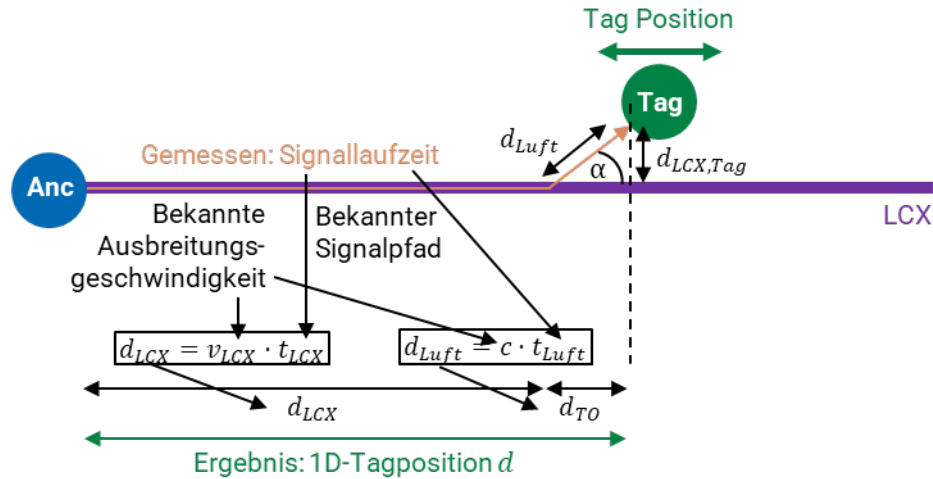


Abbildung 6: Modell Funkausbreitung zwischen Tag und Anker für die Ortung

Die kürzeste Distanz $d_{LCX,Tag}$ zwischen Tag und LCX kann für das Modell im Rahmen dieses Projekts aufgrund des konstanten Abstands des Zugs zum Gleis und damit dem LCX im Sinne der 1D-Ortung als bekannt angenommen werden. Außerdem wird für das Modell bei einer konstanten Distanz zwischen Tag und LCX angenommen, dass für verschiedene Positionen des Tags entlang des LCX ein konstanter Austrittswinkel des Signals α besteht. Daraus können der Verlauf des Signalpfads und die Aufteilung der gesamten Laufzeit auf den Anteil im LCX t_{LCX} und in der Luft t_{Luft} abgeleitet werden. Hieraus lassen sich bei bekannter Ausbreitungsgeschwindigkeit im LCX v_{LCX} und in der Luft c die Distanz d_{LCX} und der longitudinale Offset des Tags von der Stelle, an der das Signal aus dem LCX aus- oder einkoppelt, d_{TO} ableiten. Im Ergebnis kann die Position des Tags entlang des LCX mit Bezug zum Start des LCX d ermittelt werden. Sollten zusätzliche Kabel zur Verbindung des Ankers mit dem LCX eingesetzt werden, muss die zusätzlich zurückgelegte Distanz in Abhängigkeit vom Verkürzungsfaktor des Kabels von der gemessenen Distanz abgezogen werden.

Im Rahmen des Projekts wurde eine Software zur automatisierten Messung und zum einheitlichen Logging der Messdaten sowie zur Umsetzung des erarbeiteten Lokalisierungsalgorithmus erstellt. Hierbei sendet jeweils der Tag die gemessene Distanz sowie abhängig vom Messgerät weitere Messwerte über eine serielle Schnittstelle an einen Laptop mit dem Messprogramm. Das Messprogramm erlaubt sowohl die kontinuierliche Aufnahme von Messwerten als auch die Festlegung einer Stichprobengröße oder maximalen Dauer der Messung. Für jeden Messdurchlauf können durch das Programm weitere Daten, wie beispielsweise die Tag-Referenz-Position oder Informationen zur Versuchsumgebung und dem verwendeten Versuchsaufbau mitabgespeichert werden. So kann im Anschluss die automatisierte Positionierung und Auswertung des Positionierungsfehlers bei statischen Messungen mithilfe des Programms erfolgen, während gleichzeitig die Rohdaten erhalten bleiben. Mit beiden Funktechnologien wurde zunächst ein Vorversuch mit einem kurzen LCX von 15 m Länge und anschließend mit einem längeren LCX über 50 m durchgeführt. Dabei dienten die Messungen mit dem kurzen LCX dazu, zunächst mit einem bereits am Lehrstuhl vorhandenen LCX vom Typ RCF12-50JFN den

entwickelten Ortungsalgorithmus bezüglich der Ortungsgenauigkeit zu testen. Im Anschluss wurden Messungen mit dem längeren LCX auf dem im Rahmen des Projekts errichteten LCX-Testfeld in Dresden durchgeführt. Die Distanz zwischen LCX und Tag betrug dabei 1 m. Ziel hierbei war einen möglichst realitätsnahen Versuchsaufbau als Grundlage für die Vorbereitung der Messfahrten in AP 6.4 zu testen. Dabei wurde der LCX-Typ EUCARAY RMC 12-EH verwendet, der auch an der LCX-Teststrecke in Annaberg-Buchholz verbaut ist, um hier einen möglichst guten Vergleich zu ermöglichen.

Der Versuchsaufbau für die Messungen mit dem kurzen LCX ist in Abbildung 7 dargestellt. Der Tag befindet sich für die Messungen auf der Höhe von 0,25 m über dem LCX und es werden alle 1m entlang des Gleises Messwerte erfasst.

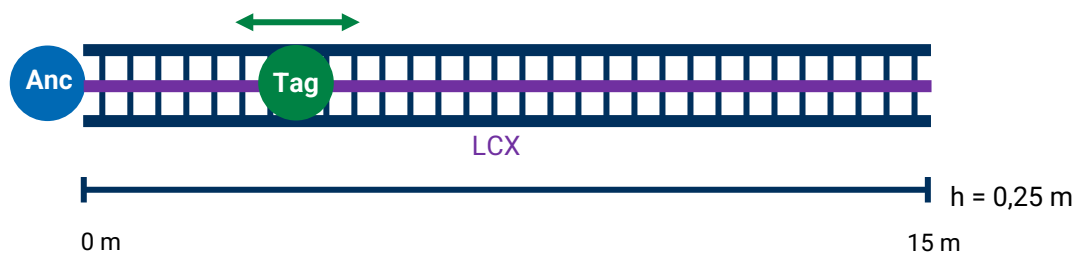


Abbildung 7: Versuchsaufbau Laboruntersuchung LCX-Ortung für Versuch 1.

Abbildung 8 zeigt links ein Foto des Versuchsaufbaus am Beispiel des UWB-Kits. Der Tag wird an einem Stativ entlang des LCX bewegt. Er ist über ein USB-Kabel mit dem Laptop mit dem Messprogramm verbunden. Der Anker wird über eine Powerbank mit Strom versorgt und ist über ein Koaxialkabel mit dem LCX verbunden. Am Ende des LCX befindet sich ein Abschlusswiderstand. Rechts in Abbildung 8 ist das LCX-Testfeld an der Schienenfahrzeughalle in Dresden mit Installation des LCX auf einer Höhe vergleichbar zum Kabelkanal in Annaberg-Buchholz dargestellt.



Abbildung 8: Foto Versuchsaufbau LCX-Ortung mit UWB mit 15 m LCX (links), aufgeständerte LCX-Installation des 50 m LCX am LCX-Testfeld in Dresden im Außenbereich der Schienenfahrzeughalle (rechts).

Eine Darstellung des absoluten Fehlers der Ortung für die Messungen mit dem 15 m langen LCX findet sich in **Abbildung 9** und **Abbildung 10**.

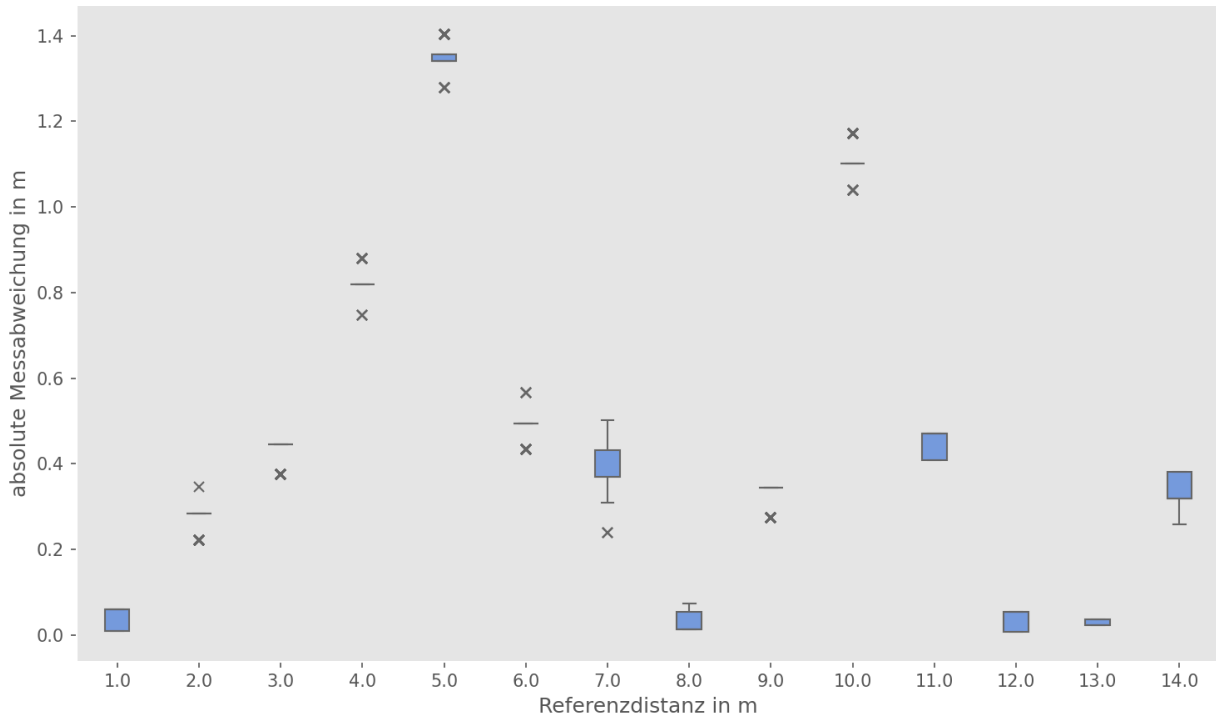


Abbildung 9: Absoluter Positionierungsfehler für die statischen Messungen mit BLE-Kit über 15 m LCX.

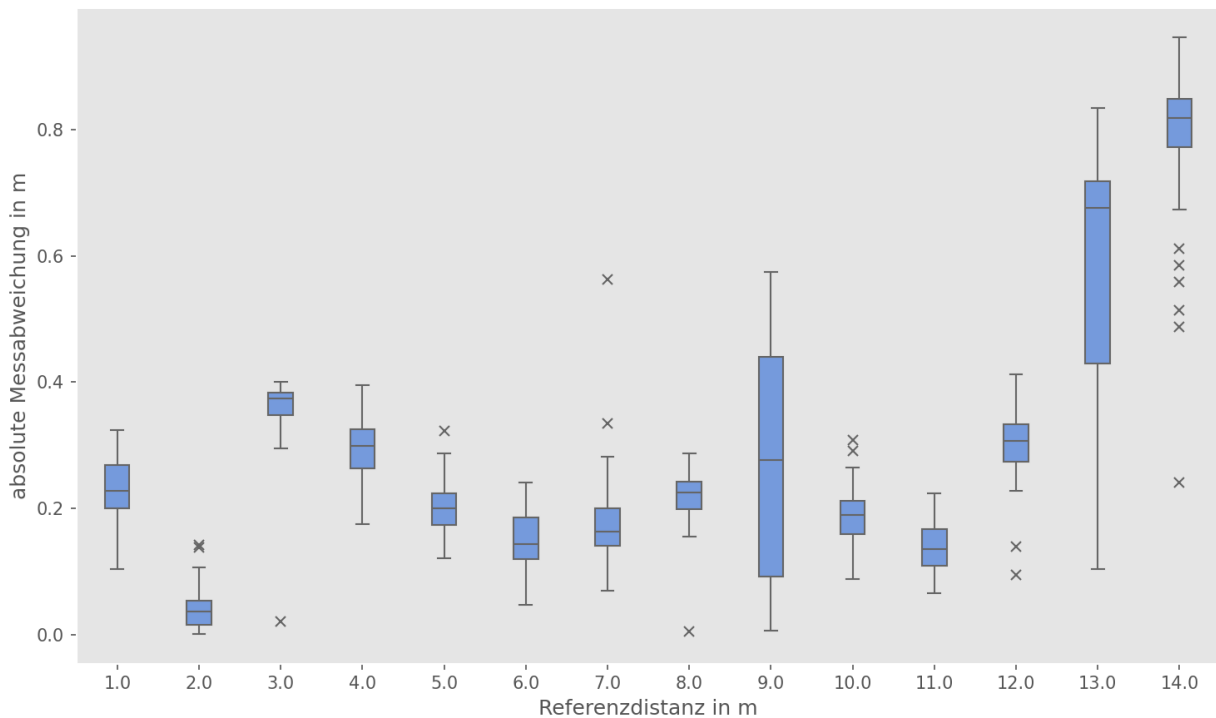


Abbildung 10: Absoluter Positionierungsfehler für die statischen Messungen mit UWB-Kit über 15 m LCX.

Der Mittelwert und der Median des absoluten Ortungsfehlers für das UWB-Kit liegen unter 30 cm. Beim BLE-Kit wurde ein Mittelwert von weniger als 50 cm und ein Median von unter 40 cm erzielt. Während UWB an allen Positionen und für alle Messwerte eine Genauigkeit von weniger als einem Meter erreichte, war dies bei Bluetooth nur für 86 % der aufgenommenen Messwerte der Fall. Die Messungen ergaben, dass das UWB-Kit genauere Ergebnisse lieferten als das BLE-Kit. Das ist aufgrund der höheren Zeitaufösung der Laufzeitmessung durch die höhere Bandbreite bei UWB erwartbar.

Bei den Messungen mit dem längeren LCX zeigt sich bei UWB eine deutliche Verschlechterung der Ortungsgenauigkeit. Im Mittelwert ergeben sich hier 96 cm und Median 94 cm als absoluter Positionierungsfehler. Die Standardabweichung steigt von 21 cm bei den Messungen mit dem 15 m langen LCX auf 61 cm. Es liegen nur noch 53 % der erfassten Abweichungen der gemessenen Position von der tatsächlichen Position des Tags unter 1 m. Zur Analyse der Gründe hierfür ist die positionsbezogene absolute Messabweichung in Abbildung 11 dargestellt.

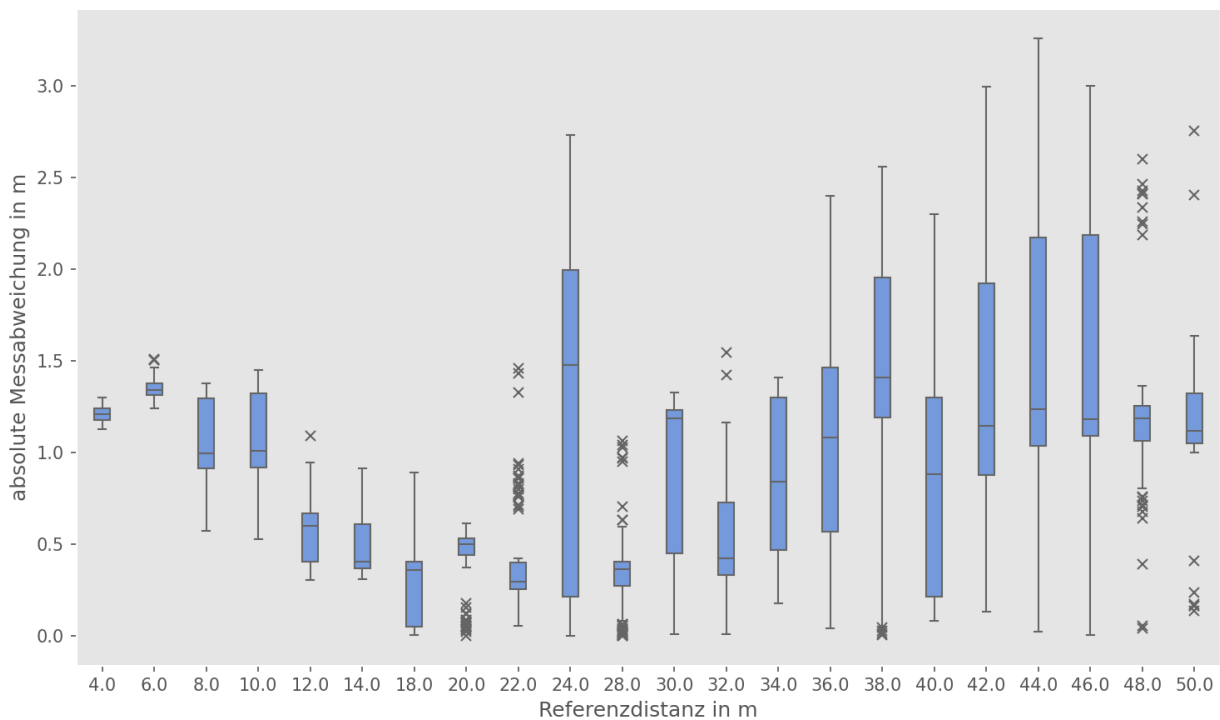


Abbildung 11: Absoluter Positionierungsfehler für die statischen Messungen mit UWB-Kit über 50 m LCX.

Es zeigt sich, dass mit zunehmender Distanz die Streuung der Messwerte zunimmt. Grund hierfür ist vermutlich die geringe Sendeleistung von UWB von -41,3 dBm im Vergleich zum BLE-Kit, die sich aufgrund der größeren Distanzen stärker auswirkt. Hierbei ist zu beachten, dass aufgrund der Kopplungsdämpfung beim verwendeten LCX davon ausgegangen werden kann, dass die maximal zulässige Sendeleistung bei Einspeisung mit -41,3 dBm nicht ausgeschöpft wurde und durch eine Verstärkung mit demselben UWB-Kit eine höhere Reichweite erzielt werden könnte. Für Näheres hierzu, siehe AP 5.2.

Im Ergebnis kann festgehalten werden, dass im Rahmen der Versuche mit dem UWB-Kit bei ausreichender Empfangsleistung eine höhere Genauigkeit erreicht werden konnte als mit dem BLE-Kit. Gleichzeitig bietet das BLE-Kit durch seine höhere Sendeleistung die Möglichkeit einer höheren Funkabdeckung entlang längerer LCX-Abschnitte. Aufgrund der unterschiedlichen Stärken wurde entschieden beide Systeme für die Messfahrten in AP 6.4 einzusetzen.

AP 4.2: GNSS-Augmentierung

Es wurde ein Konzept und Software für die Übertragung von RTK-Korrekturdaten des Dienstes SAPOS Sachsen erarbeitet. Ein Test zur Übertragung der RTK-Korrekturdaten über die Luftschnittstelle wurde erfolgreich durchgeführt. Anschließend wurde ein Plan erarbeitet, wie dieses System in die streckenseitige BS-Infrastruktur für die 5G-Qualitäts- und Verfügbarkeitsmessungen im Rahmen der in AP 6 beschriebenen Messfahrten integriert werden kann. Der Ansatz stützt sich auf die Variante 1 (Quectel-Router) für die 5G-Datenübertragung aus AP 3. Dabei werden die RTK-Korrekturdaten streckenseitig in das LCX eingespeist und auf den Zug übertragen. Anschließend können mit einem GNSS-Receiver erfasste Positionen und die Korrekturdaten auf dem Zug zusammengeführt und algorithmisch verarbeitet werden.

Um getrennte Messungen des Ortungssystems aus AP 4.3 und der Datendienste aus AP 3 zu ermöglichen wurde entschieden, für die durchgeführten Messfahrten die RTK-Korrekturdaten direkt am Zug abzurufen und nicht über das LCX zu übertragen. Für Details zum umgesetzten Versuchsaufbau, siehe AP 6.

AP 4.3 Integritätsmonitoring

Für das Integritätsmonitoring wurden ein Konzept und eine entsprechende Software für die parallele Lokalisierung mit verschiedenen Ortungs- und Funktechnologien (LCX-basierte Funkortung entsprechend AP 4.1, GNSS mit RTK-Korrekturdaten, IMU) erarbeitet. Für die Erfassung der GNSS-Position wurde der GNSS-Receiver PwrPak7 der Novatel Inc. eingesetzt. Dieser verfügt zusätzlich über eine integrierte IMU.

Eine Übersicht zur Integration der unterschiedlichen Ortungssysteme für die Messfahrten in AP 6 sowie das Integritätsmonitoring bietet Abbildung 12.

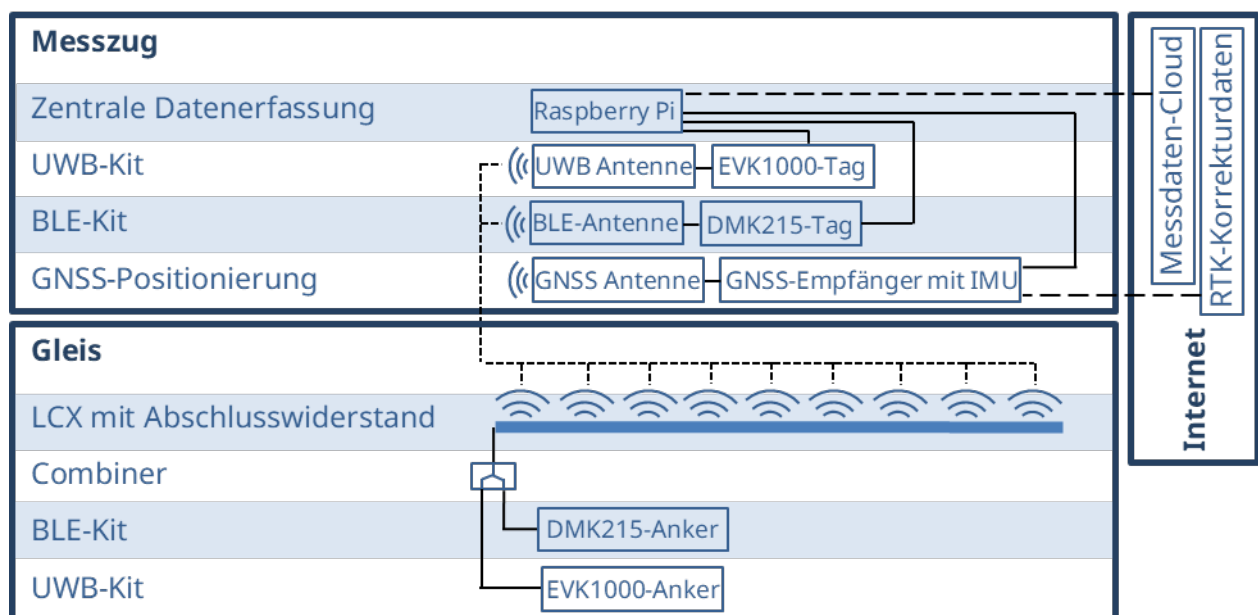


Abbildung 12: Versuchsaufbau Funkortung und Integritätsmonitoring

Die Tags des UWB- und BLE-Kits sind darauf ausgelegt, dass sie mithilfe eines Combiners parallel über das LCX empfangen und senden können. Damit ist ein direkter Vergleich der Resultate beider Kits möglich. Die Tags mit den entsprechenden Antennen des UWB- bzw. BLE-Kits befinden sich auf dem Zug. Zusätzlich ist am Zug der GNSS-Receiver mit IMU untergebracht. Von der ibes AG (ibes) wurde ein Internetzugang auf dem Zug realisiert, sodass dort auch SAPOS-RTK-Korrekturdaten für die direkte Verarbeitung auf dem GNSS-Receiver abgerufen werden können. Es wurde für alle verwendeten Messtechnologien Messsoftware erarbeitet, die darauf ausgelegt ist, dass auf dem Zug die Messergebnisse aller Technologien ausgelesen und in einem einheitlichen Logging-Format gespeichert werden können. Die Integration der Messprogramme für die parallele Messdatenerfassung auf einem Raspberry Pi und Übertragung der Messdaten in die Cloud wurde anschließend von ibes realisiert. Das Integritätsmonitoring erfolgt primär als loosely coupled Multi-System-Ansatz, bei dem die prozessierten Positionen der Einzelsysteme verglichen und auf ihre Konsistenz geprüft werden. Ziel dabei ist, dass durch die unterschiedlichen physical layer der Einzelsysteme sowie die Integration der IMU die Robustheit gegenüber Störung im Vergleich zu den Einzelsystemen deutlich erhöht wird. Das verwendete GNSS-System der Firma Novatel verfügt zudem über eine integrierte GNSS-Jamming/Spoofing-Detektion (GNSS Resilience and Integrity Technology (GRIT)) auf Signalebene. Damit kann eine Analyse des Signalspektrums durchgeführt werden und auffällige Signalmuster z.B. durch unbeabsichtigte Interferenz oder intentionales Jamming oder Spoofing detektiert werden.

AP 5: Passive Objektdetektion / Radio Sensing

In diesem AP sind die Untersuchungen zur passiven Objektdetektion mit LCX bzw. zum Radio Sensing verortet. Ziel dabei ist die Überwachung des Gefahrenraums entlang von Gleisen zur Feststellung von Sicherheitsrisiken.

AP 5.1 Labortests

Für das LCX-Sensing wurde getestet, inwieweit sich mit den bereits vorhandenen Systemkomponenten aus der UWB-Ortung in AP 4.1 Radio Sensing umsetzen lässt. Anstelle der Laufzeitmessung zur Ortung wird die Kanalimpulsantwort eines Signals gemessen. Dazu sind ein Sender (Tx) und ein Empfänger (Rx) an unterschiedlichen Enden des LCX angeschlossen. Objekte (Obj) in der Nähe des LCX sollen über Veränderungen in der empfangenen Kanalimpulsantwort im Vergleich zu einem Szenario ohne Objekt in einem Fingerprinting-Verfahren detektiert werden. Dazu wurde in den Versuchen ein Mess- und Detektionsprogramm auf Basis eines Fingerprinting-Ansatzes und maschinellem Lernen erstellt. Zunächst wurden Messungen im Labor im Absorberraum mit metallischen Gegenständen und einer Person mit einem 5 m langen LCX durchgeführt und anschließend in einer Messkampagne im Gleisumfeld mit einem 15 m langen LCX evaluiert. Abbildung 13 zeigt einen entsprechenden Versuchsaufbau für Messungen. Die Untersuchungen im Laborumfeld zeigen ähnliche Ergebnisse wie die Untersuchungen am Schienenverkehrsumfeld, siehe AP 5.2.

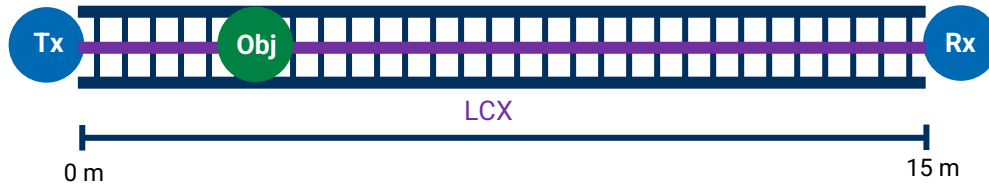


Abbildung 13: Versuchsaufbau Laboruntersuchung Radio Sensing

AP 5.2 Messkampagne

Das Ziel der durchgeführten Outdoor-Messkampagne war der Test der Möglichkeit zur Detektion und Unterscheidung verschiedener Objekte entlang des LCX mithilfe des gewählten UWB-Sensing-Ansatzes in einem Gleisumfeld. Dementsprechend wurden verschiedene Objekte in Form einer Metallplatte und unterschiedlich großen Personengruppen entlang des LCX positioniert. Für eine beispielhafte Darstellung zweier Szenarien siehe Abbildung 14. Das LCX befindet sich in der Mitte zwischen den Gleisen aufgelagert auf den Schwellen.

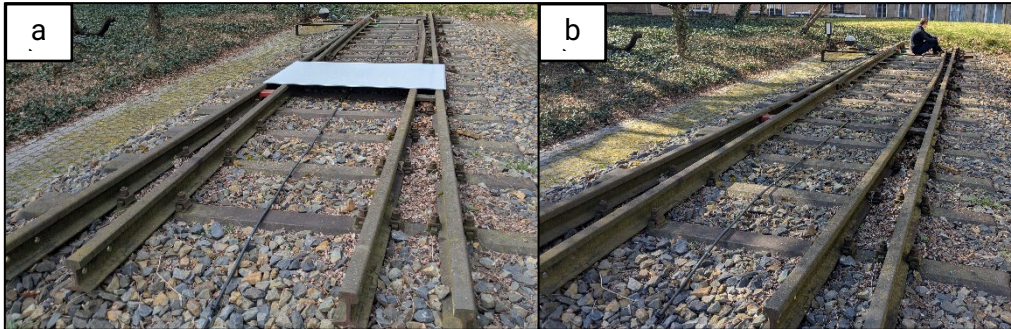


Abbildung 14: Radio Sensing mit a) Metallplatte und b) einer sitzenden Person

Ein Ergebnis der Auswertung zur Unterscheidung der verschiedenen Objekte anhand der gemessenen Kanalimpulsantworten ist in Abbildung 15 für die Klassifizierung mit dem K-nearest neighbors (KNN) Algorithmus dargestellt. Dabei werden verschiedene Positionen der Metallplatte (direkt auf dem LCX und auf der Schiene aufgelegt wie im Bild) zu einer Klasse zusammengefasst. Für die Messung mit einer Person wurden ebenfalls mehrere Messungen für mehrere Positionen entlang des LCX zusammengefasst. Im gezeigten Beispiel war mithilfe des entwickelten Auswertungsprogramms bei allen Objekten eine Zuordnung zur richtigen Klasse mit einer Wahrscheinlichkeit von mindestens 79 % möglich. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass die Unterschiede zwischen den verschiedenen Kanalimpulsantworten der Klassen im Vergleich zum Rauschen bei allen Messungen sehr gering waren. Es ist nicht eindeutig zu bestimmen, ob es sich um charakteristische Veränderungen der Kanalimpulsantwort handelt, die von der Art des Objekts abhängen, oder um Effekte wie leichte Bewegungen des LCX durch Ablegen von Objekten auf dem LCX oder andere Veränderungen im Umfeld.

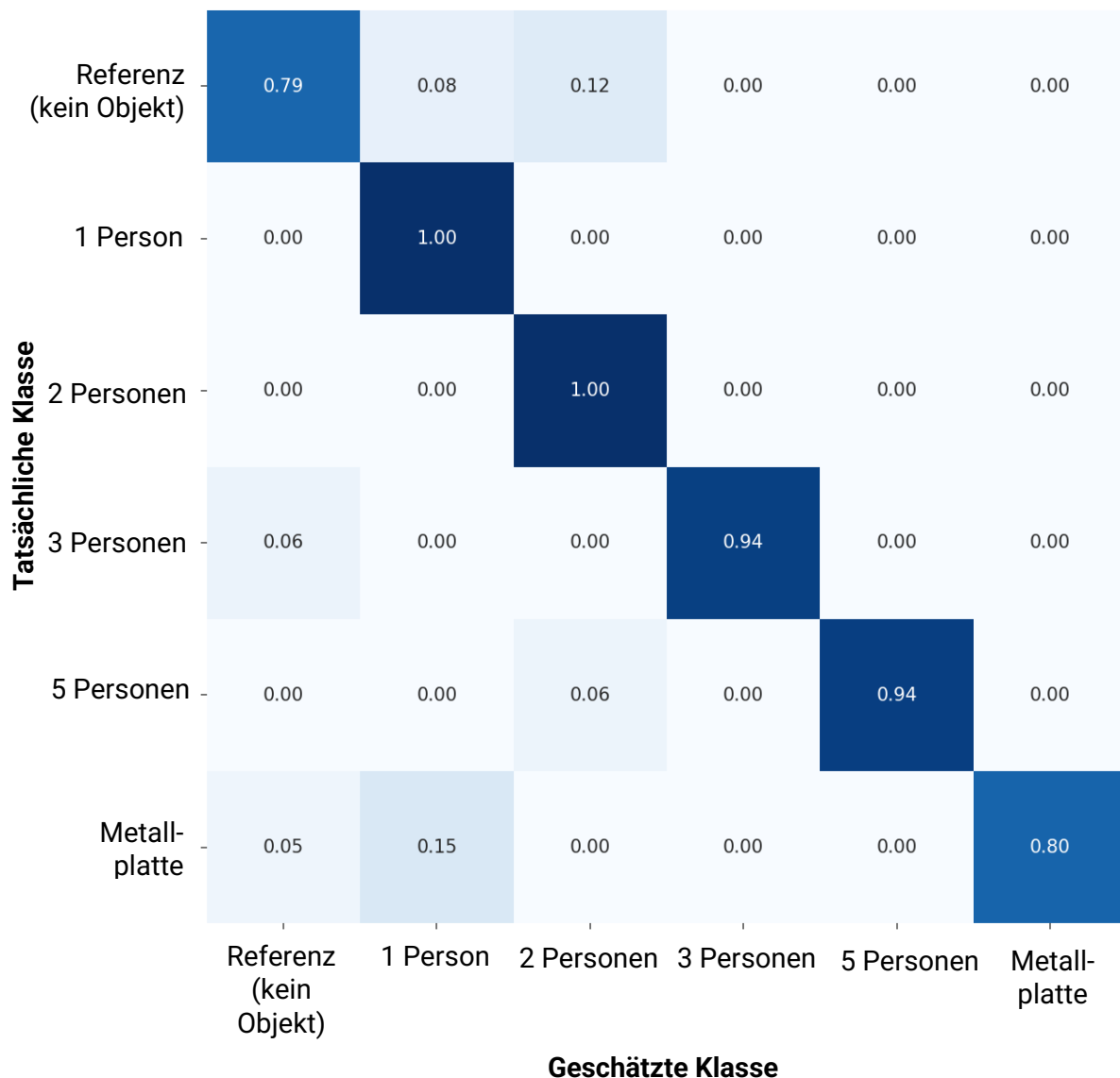


Abbildung 15: Beispielergebnis Klassifizierung mit KNN für die Radio Sensing Messungen im Gleisumfeld

Bei Betrachtung sowohl der Versuche im Labor als auch im Schienenumfeld zeigt sich, dass sich zwar innerhalb der Versuche sowohl im Gleis als auch im Absorberraum verschiedene Klassen unterscheiden ließen, wenn sich die Objekte nahe am LCX befanden, siehe Abbildung 14. Allerdings ist eine Ableitung zur Erkennung von Mustern für verschiedene Objekte aus den durchgeführten Versuchen nicht möglich.

Grund hierfür ist wahrscheinlich die bereits bei AP 4.1 besprochene geringe Sendeleistung bei UWB in Kombination mit der Kopplungsdämpfung des LCX. Im Datenblatt von LCX wird im Gegensatz zum Gewinn bei anderen Antennen üblicherweise eine Kopplungsdämpfung in Kombination mit einer Längsdämpfung entlang des LCX angegeben. Dabei beschreibt die Kopplungsdämpfung die Dämpfung des Signals zwischen LCX und Tag in einer bestimmten Distanz, beispielsweise 2 m. Die im Datenblatt angegebenen Werte zur Kopplungsdämpfung für das verwendete LCX weisen auf einen negativen Antennengewinn hin. Ein direkter Rückschluss auf den Antennengewinn ist rein aufgrund der Kopplungsdämpfung allerdings nicht möglich. Bei dem angenommenen negativen Gewinn der Antenne könnte das eingespeiste UWB-Signal zum Ausgleich der Verluste durch das LCX verstärkt werden, ohne die maximal zulässige Sendeleistung zu übersteigen. Dadurch

könnte eine bessere Detektionsgüte des Systems durch eine Erhöhung der Reichweite und des Signal-zu-Rausch-Abstands erzielt werden. Auch auf Basis vorangegangener Untersuchungen² mit anderen Antennen wird davon ausgegangen, dass mit angepassten LCX-Systemen mit höherer Sendeleistung eine bessere Detektionsgüte erzielt werden kann, als in diesem Projekt gezeigt. Eine alternative Möglichkeit zur Erhöhung der Sendeleistung und Detektionsgüte wäre die Wahl eines anderen Frequenzbereichs, in dem höhere Sendeleistungen zulässig sind.

AP 6.4 Datenspeicherung und Langzeitauswertung - Langzeitintegrität

Dieses AP basiert auf den Ergebnissen von AP 2, AP 3 und AP 4. Es soll ein System entwickelt werden, das Langzeitmessdaten von Messfahrten am im Projekt errichteten LCX-Testfeld am SRCC aggregiert. Die TUD hat die Aufgabe, die gesammelten Daten nach Integritätsparametern auszuwerten. Die Auswertung der während der Testfahrten am SRCC erfassten Daten für die Datendienste wird in Kapitel 3 erläutert. In diesem Kapitel folgt eine Analyse der Resultate der Messfahrten mit dem in Kapitel 4.3 beschriebenen System zum Integritätsmonitoring für die Zugortung.

In Zusammenarbeit mit den anderen Projektpartnern wurde der Versuchsaufbau an der SRCC-Teststrecke für die Messfahrten entwickelt. Die LCX-Teststrecke befindet sich zwischen dem Haltepunkte Annaberg-Buchholz Unterer Bahnhof und Annaberg-Buchholz Mitte. Sie führt durch eine topographisch herausfordernde Umgebung. So verläuft der Gleisabschnitt mit LCX durch ein bewaldetes Gebiet und teilweise in einem Tunnel sowie über eine Brücke. Abbildung 16 zeigt die Verortung der verschiedenen in Kapitel 4.3 vorgestellten Komponenten für den Messaufbau an der LCX-Teststrecke am SRCC an der Messlok und am Gleis. Durchgezogene Linien zwischen den Komponenten stellen Kabelverbindungen und gestrichelte Linien Funkübertragung über die Luft dar.

Das Foto rechts unten in Abbildung 16 zeigt den Gleisabschnitt mit der LCX-Teststrecke für den Versuchsaufbau zur Messung mit dem BLE-Kit. Ein 130 m langer Gleisabschnitt wurde mit einem LCX ausgestattet, das neben der Strecke am dortigen Kabelkanal befestigt ist. Siehe AP 3 für weitere Darstellungen der LCX-Position und der Umgebung der Strecke. Ein Koaxialkabel vom Ende des LCX führt in einen Schaltschrank, wo der Combiner und die Anker (im gezeigten Fall der Anker des BLE-Kits) angeschlossen und wettergeschützt untergebracht werden können.

Bei den durchgeführten Messfahrten kam eine Lok der Baureihe V 60 zum Einsatz. Im Bereich der Trittstufen der Lok ist eine Kiste mit der Ortungs-Messtechnik auf dem Zug angebracht, siehe Abbildung 16 rechts oben. Darin befinden sich unter anderem die Tags und der GNSS-Receiver. Die Antennen für das UWB- und BLE-Kit ragen aus der Seite der Kiste heraus, sodass sie sich möglichst nahe am LCX befinden. Die GNSS-Antenne wurde für möglichst guten Empfang auf dem Dach der Lok platziert.

² J. Ninnemann, P. Schwarzbach, und O. Michler, „Multipath-assisted Radio Sensing and Occupancy Detection for Smart In-house Parking in ITS“, 16. Januar 2022, *arXiv*: arXiv:2201.06128. doi: 10.48550/arXiv.2201.06128.

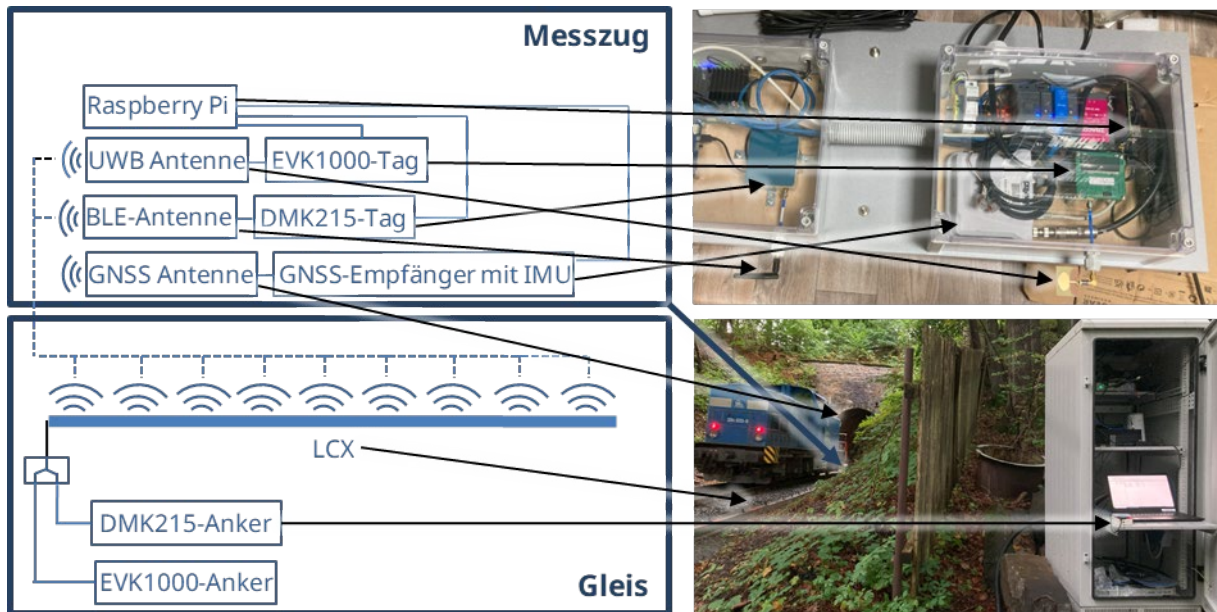


Abbildung 16: Versuchsaufbau Ortung für die Messfahrten an der LCX-Teststrecke am SRCC

Im Rahmen des Projekts wurden mehrere Messfahrten bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten und mit unterschiedlicher Fahrtrichtung durchgeführt. Dabei wurde sowohl getrennt für das UWB-Kit und das BLE-Kit als auch mit gleichzeitiger Einspeisung über den Combiner (Kombimessung) gemessen. Bei den Kombimessungen wurde die Sendeleistung des BLE-Kits zum Schutz des UWB-Kits um 30 dB gedämpft. Bei den Geschwindigkeiten ist zu beachten, dass hier dem Lokführer die Zielgeschwindigkeiten (Schrittgeschwindigkeit, 30 km/h und 50 km/h) vorgegeben wurden. Diese wurden bei den Fahrten allerdings aufgrund von Einschränkungen der Präzision bei der Fahrzeugsteuerung und Fahrplanvorgaben meist nur annähernd erreicht und im Bereich der Teststrecke auch nicht immer konstant gehalten.

Wie bereits zum AP 3 beschrieben war der GNSS-Empfang entlang der Versuchsstrecke schlecht. Trotz der Einbeziehung der SAPOS RTK-Korrekturdaten konnte im Bereich entlang des LCX keine ausreichend genaue Positionierung über GNSS erreicht werden, um eine Referenzposition für das LCX-Funkortungssystem darzustellen. Das zeigt gleichzeitig auch die Chancen, die der Ansatz der LCX-Ortung für Regionen mit starker Abschattung von GNSS-Signalen bietet. Bei der Auswertung der Messergebnisse für das BLE- und UWB-Kit wird sich aufgrund der geringen Genauigkeit der GNSS-Positionen hauptsächlich auf die über die IMU gemessenen Geschwindigkeiten stützt.

Hierbei wurde die gemessene Differenzdistanz auf Basis der Laufzeitmessungen der UWB- und BLE-Kits unter Berücksichtigung des Verkürzungsfaktors des LCX ermittelt. Zum Vergleich wurden anhand der Geschwindigkeit die zurückgelegte Differenzdistanz zwischen zeitlich aufeinanderfolgenden UWB- und BLE-Messpunkten herangezogen. Die Distanzdifferenzen wurden anschließend aufsummiert um eine Positionierung relativ zur Position des ersten Messwerts zu erhalten. Um Ausreißern in den gemessenen laufzeitbasierten Distanzen entgegenzuwirken, wurde ein rollender Median eingesetzt. Die Ergebnisse für den absoluten Fehler der Positionierung mit dieser Methode sind Abbildung 17 und Abbildung 18 dargestellt. Es wurden dabei nur Messwerte berücksichtigt, die auf eine Position nach Beginn des LCX schließen lassen.

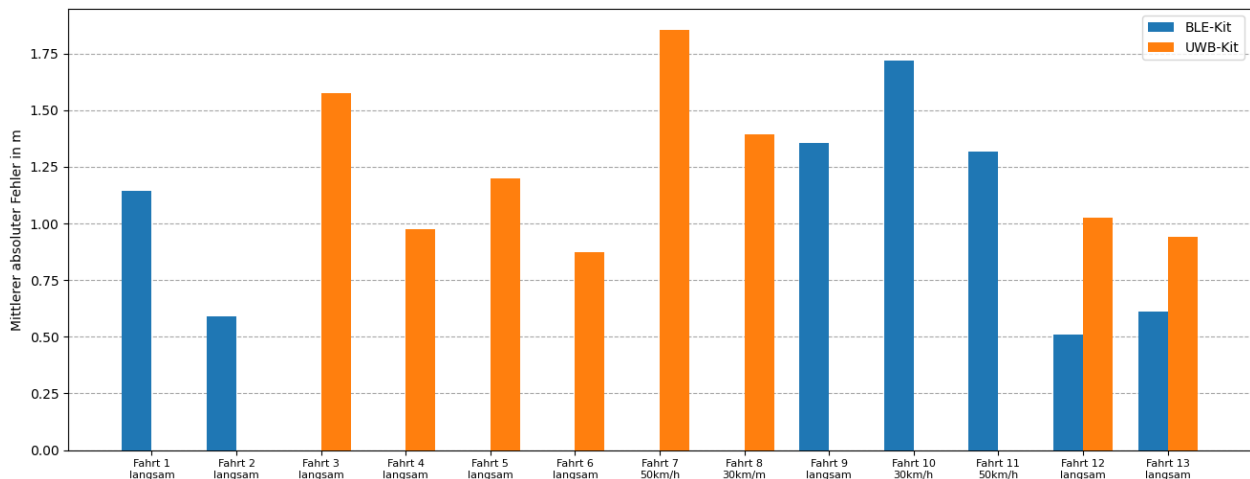


Abbildung 17: Mittlerer absoluter Fehler bei der Ermittlung der Messposition im Zeitverlauf bei den Messfahrten an der LCX-Teststrecke am SRCC

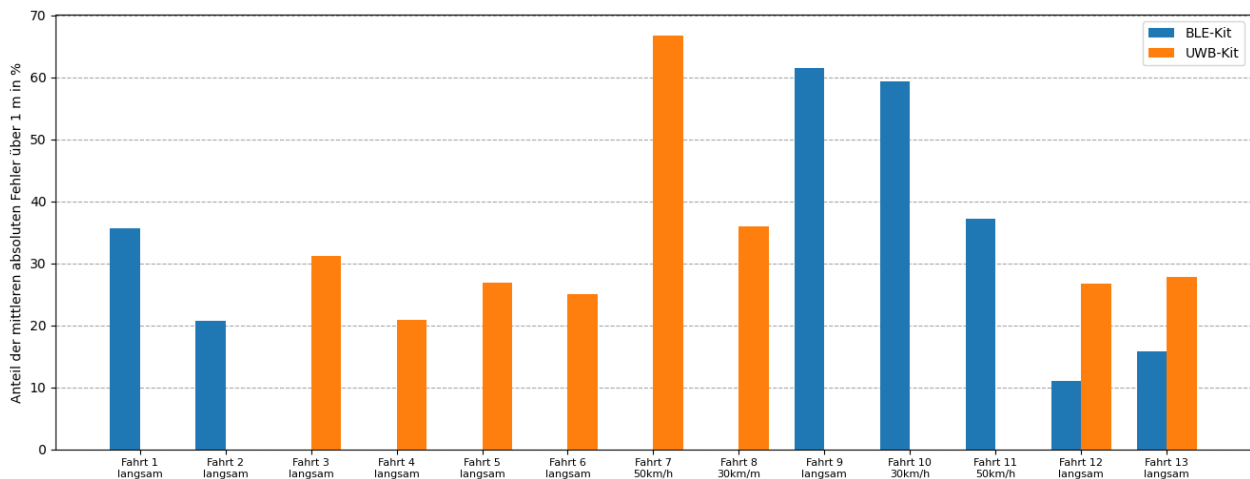


Abbildung 18: Anteil der der absoluten Fehler über 1 m bei der Ermittlung der Messposition im Zeitverlauf bei den Messfahrten an der LCX-Teststrecke am SRCC

Es ist erkennbar, dass das UWB-Kit im Durchschnitt weniger genaue Ergebnisse liefert, als das BLE-Kit. Das ist, wie bei AP 4.1 aufgeführt nicht zwingend auf eine generelle geringere Genauigkeit des UWB-Kits zurückzuführen, sondern liegt wahrscheinlich an der vergleichsweise geringen Sendeleistung. Außerdem wurde bei den Fahrten mit höherer Geschwindigkeit im Durchschnitt eine geringere Positionierungsgenauigkeit festgestellt. Bei Betrachtung aller Fahrten in Summe ist die Ungenauigkeit der Positionsbestimmung bei beiden betrachteten Kits höher als die in AP 4.1 erfassten Werte bei statischen Messungen.

Ein Grund für höhere Positionierungsfehler als in AP 4.3 kann neben dem anderen Ortungsverfahren der Einfluss von Latenzen auf die Positionierung sein. Das BLE- und UWB-Kit verfügen nicht über interne Uhren, sodass Verzögerungen durch die Dauer der Messungen mit den Kits und die Übertragung der Daten an das Raspberry Pi beim Vergleich zu den IMU-Daten nicht berücksichtigt werden können. Gleichzeitig variiert die Distanz des LCX zum Gleis entlang der LCX-Teststrecke, siehe AP 3. Auch das beeinflusst die Positionierungsgenauigkeit.

Im Ergebnis konnte gezeigt werden, dass mit beiden betrachteten Funktechnologien eine Positionierung entlang des LCX möglich ist. Ein Ansatz zur Erhöhung der Positionierungsgenauigkeit kann ein Ortungsverfahren sein, das sich nicht auf die Messung von Differenzen zwischen Positionen, sondern auf eine direkte Ermittlung der Position in Relation zum LCX-Beginn stützt. So hätten Positionierungsfehler am Anfang des LCX keinen Einfluss auf Messungen am Ende des LCX. Empfangene Messwerte mit einer zu geringen Empfangsleistung könnten zur Erhöhung der Genauigkeit herausgefiltert werden. Außerdem könnten in einem nächsten Schritt Untersuchungen zur Quantifizierung und Verringerung der Latenz ergriffen werden unter anderem mit dem Ziel der Anpassung des Systems für den echtzeitfähigen Einsatz bei höheren Geschwindigkeiten.

2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die bewilligten Personalkosten für Beschäftigte in den Entgeltklassen E12 bis E15 wurden über den gesamten Vorhabenzeitraum vollständig abgerufen. Diese Ausgaben stellen den weitaus größten Kostenpunkt dar. Die vorgesehenen Gelder für Beschäftigungsentgelte für studentische Hilfskräfte und wissenschaftliche Hilfskräfte wurden nur in Teilen abgerufen.

Im Rahmen des Projekts wurde an der TUD an einer Schienenfahrzeughalle ein LCX-Testfeld errichtet, siehe auch Kapitel 3. Die dafür notwendigen baulichen Maßnahmen, unter anderem zur Verlegung der Kabel, wurden durch die Mittel für die Vergabe von Aufträgen finanziert.

Die für das Vorhaben bewilligten Gelder für Gegenstände wurden fast vollständig abgerufen. Unter anderem wurden für die Versuchsaufbauten LCX mit entsprechendem Zubehör (HF-Adapter, Halterung, etc.) beschafft. Außerdem wurden Geräte für die Einspeisung der Signale in das LCX, darunter ein Signalgenerator und Verstärker mit entsprechendem Zubehör, erworben. Um Messungen entlang von Gleisen in Situationen durchführen zu können, in denen keine Messlok zur Verfügung stand, wurde außerdem ein schienengebundener Förderwagen mit mobiler Stromversorgung beschafft. Zudem wurden für das oben beschriebene LCX-Testfeld die für Aufbau und Errichtung erforderlichen Gegenstände wie beispielsweise Verbindungskabel, Konnektoren und eine Halterung für das LCX, erworben.

Die bewilligten Gelder für Dienstreisen wurden innerhalb der Projektlaufzeit fast vollständig benötigt. Insbesondere sind hier mehrere Dienstreisen zu Treffen mit Projektpartnern, für Messungen am Testfeld am SRCC in Annaberg-Buchholz sowie zu Veranstaltungen im Rahmen des Projekts anzumerken. Außerdem wurden mehrere Reisen zu internationalen Konferenzen und Tagungen durchgeführt, auf denen in Vorträgen das Projekt LCX4Rail vorgestellt wurde:

- Frühjahrsseminar Smart Via Vindobona 2024 in Prag
- MT-ITS 2025 in Luxemburg

Insgesamt wurden die im Projekt zur Verfügung stehenden Fördermittel vollständig ausgeschöpft. Alle Kosten können dem zahlenmäßigen Verwendungsnachweis bzw. detailliert aufgeschlüsselt der Belegliste entnommen werden.

3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Aus der Aufgabenstellung und den förderpolitischen Zielen sowie vor dem Hintergrund der Realisierung von LCX-Versuchen in realen Gleisumgebungen waren alle von der TUD im Projekt geleisteten Arbeiten erforderlich. Durch die wissenschaftliche Betrachtung der Teilaufgaben, insbesondere der laborbasierten Untersuchungen als auch den Messungen im Gleisumfeld zur Ortung und passiven Objektdetektion, wurde ein wesentlicher Beitrag zum Gesamtvorhaben geleistet. Die fachliche Tiefe der Untersuchungsmethodik, der Entwicklungs- und Implementierungsarbeiten sowie die Ergebnisevaluierung waren vor dem Hintergrund des Gesamtprojekterfolges notwendig und angemessen.

Die Arbeiten in Bezug auf Laboruntersuchungen und Vorversuche am im Rahmen des Projekts entwickelten LCX-Testfelds an einer Schienenfahrzeughalle an der TUD erfüllten dabei ihren Zweck als Grundlage für die Planung realer Messungen am SRCC sowie zur Evaluierung der Teilkomponenten und des Gesamtsystems. Dabei war die Entwicklung des Testfelds in Dresden insbesondere wichtig für Tests mit längeren LCX. Damit können die entwickelten Algorithmen und die Messsoftware sowie Messaufbauten unabhängig von den finanziell und logistisch aufwändigeren Messfahrten am SRCC getestet und optimiert werden. Hierdurch wurde auch die Grundlage für zukünftige weitergehende Forschung und Erprobung von LCX im Bahnumfeld, aufbauend auf den Ergebnissen aus LCX4Rail, geschaffen. **Abbildung 19** zeigt ein Bild der baulichen Arbeiten zur Verlegung der Kabel für das LCX-Testfeld an der Schienenfahrzeughalle in Dresden.

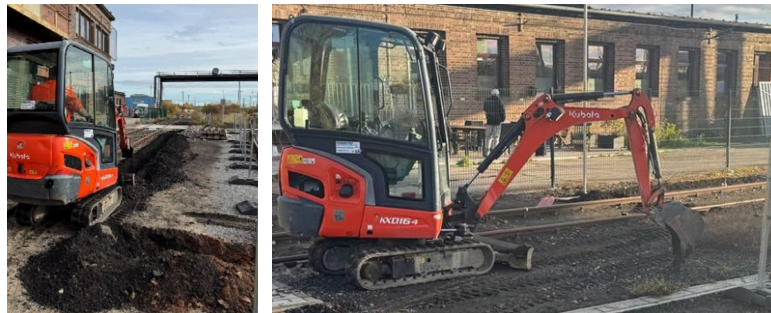


Abbildung 19: Errichtung LCX-Testfeld an der Schienenfahrzeughalle in Dresden

Die im Projekt durchgeführten dynamischen Messungen an der im Projekt errichteten LCX-Teststrecke am SRCC waren notwendig für die Untersuchung der Übertragbarkeit der vorbereitenden Messungen in Dresden auf ein realistisches Szenario im realen Zugbetrieb. Die am SRCC durchgeführten Messungen waren vor dem Hintergrund bahnbetrieblicher Rahmenbedingungen in Art und Umfang angemessen.

4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Die im Projekt erarbeiteten und erprobten LCX-Systeme zur Bündelung von Funkkommunikation, -ortung und Sensing eröffnen Chancen für eine multifunktionale, kosteneffiziente und sichere Schienenverkehrsinfrastruktur. Die durchgeführten Tests an einer Bahnstrecke des Regelverkehrs stellen einen relevanten Schritt in Richtung der Übertragung der Verfahren in die Praxis dar.

Als Hochschuleinrichtung ist eine direkte wirtschaftliche Vermarktung durch die TUD nicht vorgesehen. Die erzielten Ergebnisse bieten allerdings Potenzial für weiterführende Forschungsakquisition für wissenschaftliche Anschlussprojekte im Bereich LCX-Ortung

und -Sensing im Schienenverkehr. Perspektivisch bietet sich der Transfer der Ergebnisse auf andere Verkehrsträger und der Untersuchung weiterer Funktechnologien an.

Die im Projekt erworbenen Erkenntnisse sowie Ergebnisse fanden bereits Eingang in Lehrtätigkeiten an der TUD. Insbesondere bieten die im Rahmen des Projekts geschaffenen Testfelder und der LCX-Positionierungsdemonstrator auch Möglichkeiten, die Inhalte praktisch zu demonstrieren. Für nähere Details zu Abschlussarbeiten, durchgeführten Lehrveranstaltungen ebenso wie Veröffentlichungen, siehe Abschnitt II-1 AP 1.3 sowie Abschnitt II-6 des Schlussberichts.

5 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Im Verlauf des Projekts wurde die internationale Forschungslandschaft im Bereich LCX kontinuierlich beobachtet. Zum Zeitpunkt dieses Berichts konnten keine direkt zur Umsetzung im Projekt vergleichbaren Implementierungen identifiziert werden.

Zwar beschäftigen sich verschiedene Forschungsgruppen mit der Untersuchung von LCX-Ortungs- und Sensing-Systemen. Jedoch stellen die durchgeführten Praxistests für die Anwendung im Schienenverkehr, der Einsatz eines UWB-Systems oberhalb von 3 GHz sowie der integrierte Ansatz aller drei Funktionen Kommunikation, Ortung und Sensing einen Unterschied zu Untersuchungen an anderen Stellen dar.

6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen

Während der Laufzeit des Projekts wurde das Projekt LCX4Rail international bei den folgenden Konferenzen und Tagungen vorgestellt:

- Frühjahrsseminar Smart Via Vindobona 2024 in Prag
- MT-ITS 2025 in Luxemburg

Außerdem wurde die TUD zusammen mit MRK für Inhalte, die auch Teil des Projekts LCX4Rail waren, mit dem 3. Platz des SET4FUTURE Innovation Award 2025 des Rail.S e.V. ausgezeichnet, siehe **Abbildung 20**.



Abbildung 20: SET4Future Innovation Award 2025