

Sachbericht zum Verwendungsnachweis

Teil I – Kurzbericht

WIR!-Projekt: Leckwellenleiter für linienförmige breitbandige Funkversorgung, hochverfügbare Fahrzeugortung und radarähnliche Hinderniserkennung (LCX4Rail) (FKZ 03WIR1220A)

**Zuwendungs-
empfänger:** Technische Universität Chemnitz

Laufzeit: 03/2023 – 09/2025

Gefördert durch:



Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

1 Ursprüngliche Aufgabenstellung

Ziel des Vorhabens war die systematische Untersuchung der Eignung von Leaky Coaxial Cables (LCX) als verteilte Antenneninfrastruktur für die Bereitstellung moderner 5G-Mobilfunkdienste im Schienenverkehr. Der Fokus lag dabei auf anspruchsvollen Einsatzumgebungen wie Tunnelanlagen, Einschnitten sowie längsgerichteten Streckenabschnitten, in denen konventionelle Funklösungen aufgrund von Abschattung, Mehrwegeausbreitung und hohen Dämpfungen nur eingeschränkt einsetzbar sind.

Im Rahmen des Projekts sollte nachgewiesen werden, ob LCX-basierte Systeme eine stabile, durchgängige Funkabdeckung für bewegte Züge ermöglichen und dabei die Qualitätsanforderungen zukünftiger Bahnfunkstandards erfüllen können. Hierzu gehörte insbesondere die Bewertung relevanter Key Performance Indicators (KPI) wie Empfangsfeldstärke, Signalqualität und Störabstand. Darüber hinaus sollte das Potenzial der Technologie für zukünftige Anwendungen wie das Future Railway Mobile Communication System (FRMCS) sowie für hochpräzise Ortungs- und Automatisierungsfunktionen im Bahnbetrieb aufgezeigt werden.

2 Ablauf des Vorhabens

Das Vorhaben durchlief vier wesentliche Phasen:

1) Planungs- und Vorbereitungsphase:

In mehreren Projekttreffen wurden durch alle Beteiligten die relevanten Rahmenbedingungen für das Vorhaben festgelegt. Dazu gehörten die detaillierte Planung der Kabel- und Leitungsinfrastruktur, die Unterbringung der technischen Komponenten (Schaltschränke), die Stromversorgung, die Internetanbindung sowie die Abstimmung organisatorischer und technischer Details. Parallel wurden Simulationsmodelle erstellt und mit den geplanten realen Messungen abgeglichen.

2) Aufbau- und Installationsphase:

Zu Projektbeginn wurde eine vollständige 5G-End-to-End-Testumgebung aufgebaut. Diese umfasste einen softwarebasierten 5G-Core, eine 5G-Basisstation (gNB), Software-Defined-Radio-Hardware (USRP N321) und Leistungsverstärker zur Einspeisung der Signale in die installierte LCX-Strecke entlang einer realen Bahnlinie mit Tunnelabschnitt.

3) Durchführungsphase der Messkampagne:

Die Kernmesskampagne wurde als *Intensivmessung über zwei Tage* durchgeführt. Dabei wurden mit einer speziell instrumentierten Lokomotive unter realen Betriebsbedingungen die relevanten Funkparameter KPIs erfasst, darunter die Referenzsignal-Empfangsleistung (RSRP), die Referenzsignal-Empfangsqualität (RSRQ), das Signal-zu-Interferenz-plus-Rauschen-Verhältnis (SINR) und der Empfangene-Signalstärke-Indikator (RSSI). Es kamen systematisch variierte Testszenarien zum Einsatz, die Bandbreite (40/100 MHz), Antennentyp (LCX vs. konventionelle Antenne) und Umgebung (Tunnel vs. Freiland) kombinierten.

4) Datenauswertungs- und Analysephase:

Die Rohdaten wurden anschließend einer umfassenden Nachbearbeitung unterzogen. Ein *zentraler methodischer Beitrag* war die Entwicklung und Anwendung eines Algorithmus zur Korrektur von GPS-Ausfällen im Tunnel, der eine präzise geografische Zuordnung erst ermöglichte. Anschließend folgten statistische Auswertungen, Szenarienvergleiche und die kartografische Darstellung der Ergebnisse.

3 Zusammenfassung der wesentlichen Ergebnisse

Die Ergebnisse des Projekts zeigen, dass LCX-Kabel eine sehr leistungsfähige Lösung zur Realisierung einer durchgängigen 5G-Funkversorgung im Schienenverkehr darstellen. Insbesondere in Tunnelabschnitten konnte eine stabile und gleichmäßige Funkabdeckung erreicht werden – ohne die typischen Versorgungslücken beim Ein- und Ausfahren, wie sie bei klassischen Antennenlösungen auftreten.

Darüber hinaus wurde festgestellt, dass die nutzbare Funkabdeckung teilweise deutlich über das physische Ende der LCX-Installation hinausgeht. Dies eröffnet Potenziale für eine kosteneffizientere Planung zukünftiger Systeme, da weniger zusätzliche Infrastruktur benötigt wird. Auch innerhalb der Lokomotive konnten trotz metallischer Abschirmung ausreichend stabile Signalqualitäten gemessen werden, sodass eine zuverlässige Datenübertragung gewährleistet war.

Das Projekt „LCX4Rail“ hat eine einmalige Testinfrastruktur für Forschung und Entwicklung im realen Bahnumfeld geschaffen. Es adressiert ein zentrales Problem der Schienenkommunikation: Die geografischen Anforderungen (Täler, Tunnel) erfordern bei klassischen Lösungen eine hohe Zahl an Basisstationen. LCX ermöglicht hingegen eine zuverlässige, linienförmige Versorgung und ist daher ideal für die topologischen Anforderungen des Bahnverkehrs geeignet. Der erfolgreiche Test unter realen Bahnbetriebsbedingungen lieferte einen unverzichtbaren Erkenntnisgewinn für die Entwicklung robuster und skalierbarer Lösungen und stärkt die Innovationskraft im Bereich kritischer Infrastrukturen.

Insgesamt bestätigen die erzielten Ergebnisse die hohe Eignung von LCX-Systemen als zentrale Komponente zukünftiger 5G- und FRMCS-Kommunikationslösungen im Schienenverkehr und bilden eine belastbare Grundlage für weiterführende Forschung und Anwendung.

Sachbericht zum Verwendungsnachweis

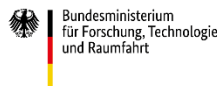
Teil II – Ausführlicher Bericht

WIR!-Projekt: Leckwellenleiter für linienförmige breitbandige
Funkversorgung, hochverfügbare Fahrzeugortung und
radarähnliche Hinderniserkennung (LCX4Rail)
(FKZ 03WIR1220A)

**Zuwendungs-
empfänger:** Technische Universität Chemnitz

Laufzeit: 03/2023 – 09/2025

Gefördert durch:



Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

1 Durchgeführte Arbeiten

Die TU Chemnitz führte im Projekt LCX4Rail umfangreiche Arbeiten zur Evaluierung von 5G-Daten-diensten über Leaky Coaxial Cable (LCX) durch. Diese umfassten im Wesentlichen die Planung, Durchführung und Analyse einer Messkampagne unter Realbedingungen und werden im Folgenden ausführlich dargestellt.

1.1. Aufbau des End-to-End-5G-Testbeds

Das End-to-End-5G-Testbed wurde konzipiert und realisiert. Der streckenseitige Aufbau umfasste:

- die Software-basierte Implementierung einer vollständigen 5G-Architektur mit OpenAirInterface (OAI), bestehend aus 5G Core Network (5GC) und 5G gNB (Basisstation) auf einer PC-Plattform,
- die Ansteuerung eines Software Defined Radio (USRP N321) als Radio-Frontend zur Erzeugung und Sendung des standardkonformen 5G New Radio (NR)-Signals,
- die Integration eines Hochfrequenz-Leistungsverstärkers (30 dB Verstärkung) zur Einspeisung des Signals in das LCX-Kabel,
- die Implementierung eines SPDT-RF-Switches mit hoher Isolierung (52 dB) zum Schutz des empfindlichen Empfangspfads vor dem leistungsstarken Sendesignal, was eine kritische Komponente für den stabilen Betrieb des Voll-Duplex-Systems darstellte,
- die Einspeisung des verstärkten 5G-Signals in das entlang der Bahnstrecke verlegte, vertikal polarisierte LCX-Kabel, welches als verteilte Antenne fungiert.

1.2. Messaufbau

Abbildung 1 skizziert die Kernarchitektur des End-to-End-5G-Testbeds, das zur Validierung des LCX4Rail-Systems verwendet wurde.

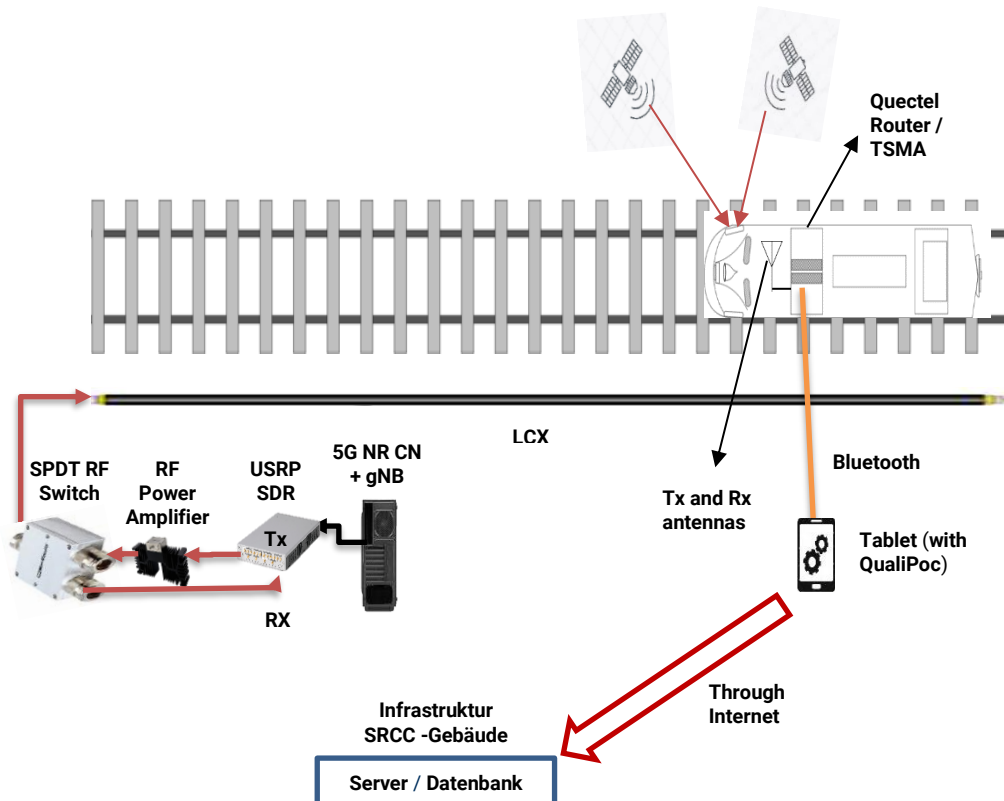


Abbildung 1. Übersicht des 5G-Testbed-Setups im Labor.

Dieser Aufbau lässt sich in zwei Hauptsegmente unterteilen: die Netzwerk-/Übertragungsseite und die mobile Empfangs-/Messeite.

1.2.1. Netzwerk- und Übertragungsseite

Dieses Segment repräsentiert die feste 5G-Netzinfrastruktur, die das Signal erzeugt und in das LCX-Kabel einspeist.

- A. OpenAirInterface (OAI) 5G Stack: Dies ist das zentrale Software-Framework, das auf einem PC läuft. Dies umfasst:
- 5G Core Network (CN): das „Gehirn“ des Netzwerks, das Datenverbindungen und Sitzungsverwaltung abwickelt.
 - 5G gNB (Basisstation): die Software, die die digitalen Signalverarbeitungsfunktionen der Basisstation implementiert.

Abbildung 2 zeigt den Technischrank, in dem das vollständige 5G-Basisstationssystem untergebracht ist.

- B. USRP N321 SDR (Software Defined Radio): Dieses hochleistungsfähige SDR fungierte als HF-Frontend für den gNB. Die OAI-Software auf dem PC steuerte den USRP N321, um den standardkonformen 5G New Radio (NR)-Wellenform zu erzeugen und zu senden. Sie empfing auch Uplink-Signale vom Zug.
- C. HF-Leistungsverstärker: Das Ausgangssignal vom USRP N321 ist Niedrigleistung. Dieses wird einem HF-Leistungsverstärker zugeführt, der das Signal auf ein für die Einspeisung in die lange LCX-Kabelstrecke geeignetes höheres Leistungsniveau verstärkt (PA-Verstärkung = 30 dB) und so die verschiedenen Verluste im System kompensiert.
- D. SPDT-HF-Schalter (kritisches Schutz- und Duplexing-Bauteil): Das verstärkte Signal wurde dann durch einen Single-Pole Double-Throw (SPDT) HF-Schalter (ZFSWA2-63DR+) geleitet. Diese Komponente hatte einen wichtigen Doppelzweck:
- *Duplexing-Steuerung*: Sie trennte die Downlink- (Sende-) und Uplink- (Empfangs-)Pfade. Dies ermöglichte es dem System, zwischen Sende- und Empfangsmodus umzuschalten, was für Vollduplex-Kommunikation wesentlich ist.
 - *Empfängerschutz*: Ein Hauptmerkmal dieses Schalters ist seine hohe Isolierung von 52 dB zwischen seinen Anschlüssen. Dies stellte sicher, dass wenn das Hochleistungs-Downlink-Signal (+10 dBm) gesendet wurde, es wirksam vom empfindlichen Empfangspfad, der mit dem USRP verbunden war, isoliert wurde. Dies war eine entscheidende Designmaßnahme, um Schäden am Frontend des USRP N321 durch das leistungsstarke Sendesignal zu verhindern, und ergänzte die Sicherheitsbegrenzung der Eingangsleistung.

Abbildung 3 stellt das HF-Frontend des Systems dar – bestehend aus dem USRP N321, einem Leistungsverstärker und einem SPDT-HF-Schalter (ZFSWA2-63DR+).

- E. LCX-Kabel: Das verstärkte Signal wird in das LCX eingespeist, das als verteilte Antenne fungiert und das Signal entlang des Bahngleises und Tunnels abstrahlt.



Abbildung 2. 5G-Core und gNB in einem Technischrank im Wald.

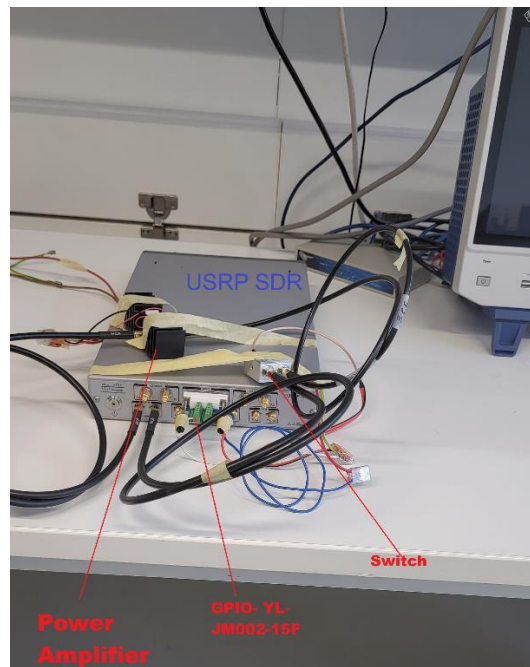


Abbildung 3. HF-Schalter zur Duplexierung und Empfängerentkopplung.

1.2.2. Mobile Empfangs- und Messeite (an Bord der Lokomotive)

Dieses Segment befand sich auf dem fahrenden Zug und war für den Empfang des abgestrahlten Signals und das Sammeln von Leistungsdaten verantwortlich. Es besteht aus:

- Empfangsantenne:
Eine dedizierte Antenne auf der Lok empfängt das aus dem LCX austretende (geleakte) Signal.
- Messinstrument:
Verwendet wurde ein ROHDE & SCHWARZ TSMA6B mobiler Netzwerkscanner. Dies ist ein dediziertes, hochpräzises Instrument, das speziell für Drive-Tests und Netzwerkoptimierung entwickelt wurde. Der TSMA6B war mit einer dedizierten Indoor/Outdoor-Antenne verbunden, um das vom LCX abgestrahlte Signal zu empfangen. Er wurde für passives Scannen konfiguriert, was bedeutet, dass er kontinuierlich die physikalischen Key Performance Indicators (KPIs) maß und aufzeichnete, ohne aktiv eine Verbindung zum Netzwerk herzustellen. Dies lieferte unverfälschte, unvoreingenommene Daten zu:
 - RSRP (Reference Signal Received Power)
 - RSRQ (Reference Signal Received Quality)
 - SINR (Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio)
 - RSSI (Received Signal Strength Indicator)
- Tablet mit QualiPoc: Ein Tablet, auf dem die professionelle Messsoftware "QualiPoc" lief, war mit dem TSMA6B verbunden. QualiPoc wurde verwendet, um den TSMA6B zu steuern, das 5G-Signal zu dekodieren und alle Key Performance Indicators (KPIs), wie RSRP, RSSI, SINR und RSRQ, in Echtzeit aufzuzeichnen.
- Datenaufzeichnung und Konnektivität:
 - Bluetooth: wurde für die lokale Konnektivität zwischen Geräten im Zug verwendet.
 - Internetverbindung: Das Tablet nutzte eine separate Internetverbindung (z. B. über Mobilfunk), um die gesammelten Messdaten in Echtzeit zu einem zentralen Server/Datenbank für die Nachverarbeitung und Analyse hochzuladen.

Abbildung 4 zeigt den Aufbau für die Indoor-Messungen innerhalb der Lokomotive. Die Messgeräte, insbesondere der Rohde & Schwarz TSMA6B Scanner sowie das Tablet mit der QualiPoc-Software, sind im Innenraum installiert.



Abbildung 4. Aufbau für Indoor Test.

Abbildung 5 zeigt den Aufbau für die Outdoor-Messungen.



Abbildung 5. Aufbau für Outdoor-Test.

Abbildung 6 zeigt das entlang der Bahnstrecke installierte Leaky-Coaxial-(LCX)-Kabel.



Abbildung 6. LCX-Kabel entlang des Bahngleises.

1.3. Definition und Durchführung der Messkampagne

Die Tabelle 1 skizziert prägnant die systematische und umfassende Testmatrix, die für das LCX4Rail-Projekt entwickelt wurde. Dieser strukturierte Ansatz wurde konzipiert, um den Einfluss mehrerer Schlüsselvariablen auf die Leistung des 5G-over-LCX-Systems zu isolieren und zu bewerten und so robuste und universell anwendbare Ergebnisse zu gewährleisten.

Die Matrix untersucht die folgenden drei unabhängigen Variablen in allen möglichen Kombinationen:

1 **Antennentyp (Antenna Type):**

- **LCX:** Repräsentiert das neuartige verteilte Antennensystem, das untersucht wird und ideal für lineare und geschlossene Abdeckungsbereiche ist.
- **Antenne (omnidirektional):** Dient als Referenz-Baseline und repräsentiert traditionelle, punktförmige Strahlungsmuster, wie sie in konventionellen Installationen verwendet werden.

2 **Ausbreitungs Umgebung (Environment):**

- **Indoor:** Simuliert Umgebungen mit signifikanter Mehrwegeausbreitung, Abschattung und Signaldurchdringungsverlusten (z. B. Bahnhöfe, Werkstatthallen).
- **Outdoor:** Repräsentiert Szenarien mit längeren Ausbreitungsdistanzen, weniger Reflektionen und unterschiedlichen Dämpfungseigenschaften (z. B. freie Strecken, Einschnitte).

3 **Systembandbreite (Bandwidth):**

- **40 MHz:** Konfiguriert das System für ein besseres Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) und Robustheit, wenn auch mit einer niedrigeren Spitzendatenrate.
- **100 MHz:** Konfiguriert das System für höhere Datentransferkapazität und Durchsatz, möglicherweise auf Kosten einer erhöhten Anfälligkeit für Rauschen und Interferenzen.

Test ID	Antenna Type	Environment	Bandwidth	Test Type	Interference
1	LCX	Indoor	100 MHz	L1	DNN 3
2	LCX	Outdoor	40 MHz	L1	DNN 3
3	LCX	Outdoor	40 MHz	L1	DNN 3
4	LCX	Outdoor	100 MHz	L1	DNN 3
5	LCX	Indoor	40 MHz	L1	DNN 3
6	LCX	Indoor	100 MHz	L1	DNN 3
7	LCX	Indoor	40 MHz	L1	DNN 3
8	LCX	Outdoor	100 MHz	L1	DNN 3
9	Omni	Indoor	100 MHz	L1	DNN 3
10	Omni	Indoor	40 MHz	L1	DNN 3
11	Omni	Outdoor	40 MHz	L1	DNN 3
12	Omni	Outdoor	100 MHz	L1	DNN 3
13	LCX	Indoor	40 MHz	L3	No
14	LCX	Indoor	40 MHz	L3	No
15	LCX	Indoor	40 MHz	L3	No
16	LCX	Indoor	40 MHz	L1	No
17	LCX	Outdoor	40 MHz	L1	No
18	LCX	Outdoor	100 MHz	L1	No

Tabelle 1. Die Insgesamt 18 ausgeführte Testszenarien

Abbildung 7 zeigt die definierten Testszenarien zur Untersuchung von Abdeckung, Multipath-Verhalten sowie des Zusammenhangs zwischen SINR und Bandbreite für LCX- und Antennenkonfigurationen im Indoor- und Outdoor-Bereich.

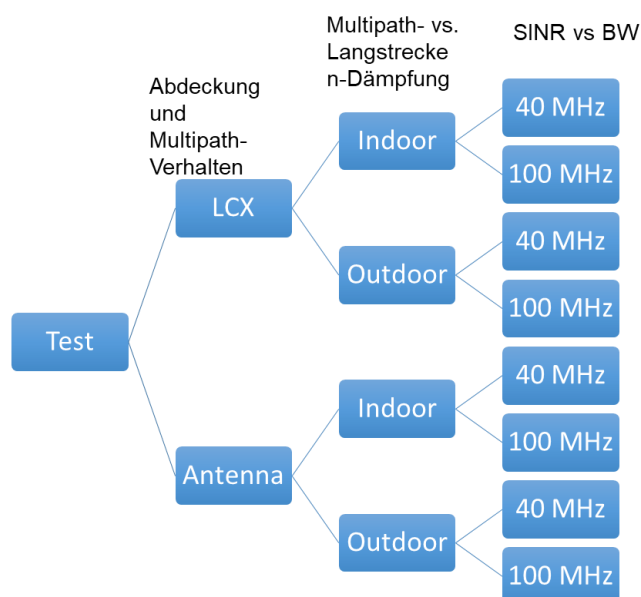


Abbildung 7. Testszenarien.

Zwecke dieser Szenarien

1 Bewertung der Leistung in verschiedenen Ausbreitungsbedingungen (Indoor vs. Outdoor)

Indoor-Umgebungen führen zu Mehrwegereflexionen, Abschattung und Signaldurchdringungsverlusten. Outdoor-Umgebungen beinhalten längere Ausbreitungsstrecken, weniger Reflexionen und andere Dämpfungseigenschaften.

Die Durchführung beider Tests stellt sicher, dass das System unter realen Bedingungen zuverlässig funktioniert.

2 Vergleich des Antennenverhaltens (LCX vs. Antenne)

LCX verhält sich wie eine verteilte Antenne – ideal für Tunnel, Innenraumkorridore und kontrollierte Ausbreitungspfade. Omnidirektionale Antennen strahlen gleichmäßig ab und repräsentieren realistische, offene Installationen.

Der Test beider Typen validiert:

- die Gleichmäßigkeit der Abdeckung,
- die Empfindlichkeit gegenüber Mehrwegeausbreitung,
- die Anfälligkeit für Interferenzen sowie
- installationsspezifische Leistungsunterschiede.

3 Beurteilung der Systemrobustheit bei verschiedenen Bandbreitenkonfigurationen (40 MHz vs. 100 MHz)

Eine höhere Bandbreite (100 MHz) bietet mehr Datentransferkapazität (höherer Durchsatz), ist aber anfälliger für Rauschen und Interferenzen. Eine niedrigere Bandbreite (40 MHz) bietet ein besseres SNR, aber niedrigere Spitzendatenraten.

Der Test beider Konfigurationen hilft bei der Analyse:

- der Abwägung zwischen Datenrate und Zuverlässigkeit,
- der Linearitätsleistung der HF-Kette (z. B. Leistungsverstärker und HF-Schalter) sowie
- der Bandbreitenempfindlichkeit unter Interferenzeinfluss.

1.4. Entwicklung und Anwendung der GPS-Misalignment-Korrektur

Ein kritischer methodischer Beitrag war die Entwicklung eines Algorithmus zur Bereinigung und Rekonstruktion der GPS-Trajektorie, da im Tunnel und in dicht bewaldeten Abschnitten der Satellitenempfang ausfiel oder stark verrauscht war. Der mehrstufige Ansatz umfasste:

- **Detektion invalider GPS-Punkte** durch Konsistenzchecks (unrealistische Sprünge, Beschleunigungen, Rückwärtsbewegung, Schleifenbildung)
- **Rekonstruktion der Trajektorie** mittels Interpolationsmethoden (linear, median-geglättet, PCHIP) für kurze Lücken
- **Anwendung eines Kalman-Filters** zur prädiktiven Trajektorien-schätzung bei längeren Ausfallzeiten (z. B. im Tunnel), basierend auf einem Bewegungsmodell
- **automatische Selektion** des optimalen Rekonstruktionsverfahrens basierend auf Qualitätsmetriken der Trajektorie. Dieses Verfahren war essentiell für die präzise geografische Zuordnung aller Messdaten und stellte eine eigenständige wissenschaftlich-technische Leistung dar.

1.5. Detaillierte Auswertung der Key Performance Indicators (KPIs)

Anhand der bereinigten Daten wurde eine umfassende vergleichende Leistungsanalyse zwischen LCX und konventioneller Antenne durchgeführt:

- **RSRP:** Die LCX zeigte eine deutlich stabilere und kontinuierlichere Signalstärke über die gesamte Strecke, insbesondere im Tunnel, wo die konventionelle Antenne drastische Einbrüche erlitt. Die Abdeckung blieb auch bis zu 100 Meter über das physische Ende des Kabels hinaus mit akzeptablen Werten (> -110 dBm) erhalten.
- **SINR:** Der SINR zeigte für die LCX einen stabileren und insgesamt höheren Verlauf, was auf eine bessere Verbindungsqualität und Robustheit gegenüber Interferenzen hinweist.
- **RSSI & RSRQ:** Auch diese Kennwerte bestätigten die Überlegenheit der LCX in Bezug auf Stabilität und Qualität, besonders unter anspruchsvollen Bedingungen. Die Ergebnisse wurden in Distanzdiagrammen, geografischen Karten und gebinnten Mittelwertvergleichen visualisiert und statistisch ausgewertet.

1.6. Beispielhafte Ergebnisse zweier repräsentativer Testfälle – VERTRAULICH

Hinweis: Der Abschnitt wurde aus Gründen der Vertraulichkeit in der öffentlich einsehbaren Berichtsversion gelöscht.

1.7. Abweichungen gegenüber der ursprünglichen Arbeitsplanung

- **Langzeitmessungen:**
 - o **Geplanter Ansatz:** Kontinuierliche Datenerfassung über einen Zeitraum von mindestens 2-4 Wochen.
 - o **Ursache für das Nichterreichen:** Die Verfügbarkeit des Messzugs der Deutschen Bahn (DB) war auf das finale, zweitägige Messfenster am Ende des Projekts begrenzt. Eine längerfristige Nutzung der aktiven Bahnstrecke für rein wissenschaftliche Messzwecke war aus betrieblichen Gründen nicht realisierbar.
- **5G-Handover:**
 - o **Geplanter Ansatz:** Untersuchung der Zuverlässigkeit und Geschwindigkeit des Handovers einer mobilen Verbindung von einer mit LCX gespeisten gNB zu einer LCX während der Zugfahrt.
 - o **Ursache für das Nichtdurchführen:** Dieses Experiment wurde aus einer Kombination praktischer, zeitlicher und wissenschaftlicher Erwägungen nicht durchgeführt:
 1. **Bürokratische Hindernisse:** Die Abstimmungs- und Genehmigungsverfahren für Installationen im hochregulierten Bahnumfeld erwiesen sich als sehr komplex und zeitaufwändig.
 2. **Praktische und infrastrukturelle Komplexität:** Die experimentelle Umsetzung hätte die Installation einer zweiten, vollständigen 5G-Infrastruktur (inkl. gNB, USRP, Leistungsverstärker, Schutzschalter) in einem separaten Technischrank an einem anderen Streckenpunkt erfordert. Die Bereitstellung eines geeigneten, sicheren und netzseitig versorgten Standorts sowie die logistische und genehmigungsrechtliche Koordination dieses zusätzlichen Aufbaus waren im gegebenen Projektrahmen nicht realisierbar.
 3. **Kritische Zeitverzögerung durch Witterung:** Globale Lieferengpässe verschoben die notwendigen Außenarbeiten in den Winter, wo Installationen im Erzgebirge aufgrund technischer (Frost, Kondenswasser) und arbeitsschutzrechtlicher Gründe (Schnee,

Glätte) unmöglich waren. Die Realisierung im verbleibenden Zeitrahmen war damit ausgeschlossen.

4. **Geringer zusätzlicher Erkenntniswert:** Handover (Zellwechsel) ist eine fundamentale, standardisierte und in allen kommerziellen 5G-Netzen zuverlässig implementierte Kernfunktionalität. Ein spezifischer Test dieser Standardfunktion hätte voraussichtlich keine neuen, projektrelevanten Erkenntnisse über die grundlegende Eignung der LCX-Technologie geliefert. Der Fokus des Projekts lag auf der Validierung der LCX-spezifischen Ausbreitungseigenschaften und Verbindungsstabilität, nicht auf der Bestätigung standardkonformer Netzwerkfunktionen.
 - **Konsequenz:** Das Handover-Experiment wurde nicht umgesetzt. Diese Entscheidung stellt keine kritische Lücke in der Projektevaluierung dar, da das primäre Ziel – der Nachweis einer robusten Ende-zu-Ende-Kommunikation über LCX – durch die umfangreichen anderen Messkampagnen vollständig erreicht wurde. Die Handover-Fähigkeit zwischen LCX wird als gegeben vorausgesetzt, da sie auf standardisierten Netzwerkmechanismen basiert.

2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Das Projekt wurde an der TU Chemnitz durch die Professur Nachrichtentechnik und das Zentrum für Wissens- und Technologietransfer durchgeführt. Die im Rahmen des Projektes entstandenen Ausgaben betragen insgesamt 113.579,38 € (zzgl. Projektpauschale i. H. v. 22.715,88 €). Sie liegen damit 31.756,41 € (ohne Projektpauschale) unter der bewilligten Zuwendung.

Die Ausgaben wurden im Wesentlichen für Personalausgaben zur Beschäftigung wissenschaftlicher Mitarbeiter an der TU Chemnitz (86.021,83 €) und die Vergabe von Aufträgen (14.456,75 €) verwendet. Hier lagen die tatsächlichen Ausgaben in Summe auch nur 1.377,21 € unter den geplanten Ausgaben.

Gegenüber der Planung bei Antragstellung wurden weniger Mittel für die Beschäftigung von wissenschaftlichen Hilfskräften verausgabt (4.913,60 € verausgabt, 7.680,00 € geplant). Dies lag u. a. daran, dass insbesondere durch weniger Testfahrten auch weniger Unterstützung erforderlich war und aufgrund von Schwierigkeiten bei der Personalakquise teilweise Aufgaben von den wissenschaftlichen Mitarbeitern selbst übernommen wurden.

Die benötigten Ausgaben für die Anmietung eines Forschungszugs für Testfahrten unter realen Bedingungen waren geringer als ursprünglich geplant (8.187,20 € verausgabt, 35.000 € geplant). Neben einer etwas kostengünstigeren Realisierung der Testfahrten konnte nicht die geplante Anzahl von Messfahrten (Messungen über mindestens 2-4 Wochen) durchgeführt werden. Die Verfügbarkeit des Messzugs der Deutschen Bahn war auf ein zweitägiges Messfenster am Ende des Projekts begrenzt. Eine längerfristige Nutzung der aktiven Bahnstrecke für rein wissenschaftliche Messzwecke war aus betrieblichen Gründen nicht realisierbar.

3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Die durchgeführten Arbeiten waren in vollem Umfang notwendig und fachlich angemessen, um die gestellten Forschungsziele zu erreichen und eine belastbare Bewertung der LCX-Technologie für den Bahnsektor vorzunehmen. Diese Einschätzung begründet sich wie folgt:

- **Notwendigkeit eines vollständigen, realen Testbeds:**

Die reine Simulation oder Labortests wären unzureichend gewesen, um das Verhalten der Technologie unter den spezifischen, dynamischen und störbehafteten Bedingungen des Bahnbetriebs zu validieren. Die Evaluierung unter Realbedingungen (bewegte Lok, Tunnel, Wetter, metallische Abschirmung) war eine zwingende Voraussetzung, um die Technologiereife (TRL) für eine spätere Anwendung signifikant zu erhöhen und konkrete Implementierungsdaten zu liefern.

- **Notwendigkeit einer systematischen, multivariaten Testmatrix:**

Die Definition der 18 Szenarien war angemessen, um den Einfluss der Schlüsselparameter (Umgebung, Bandwidth, Antennentyp) isoliert zu untersuchen. Diese methodische Strenge erlaubt generalisierbare Aussagen über die Leistungsfähigkeit von LCX.

- **Notwendigkeit spezialisierter Methoden zur Datenqualitätssicherung:**

Der Einsatz professioneller Messtechnik (R&S TSMA6B, ROMES) war notwendig, um metrikgenaue und zuverlässige KPIs zu erfassen. Die eigenständige Entwicklung eines Algorithmus zur GPS-Korrektur war eine direkte und notwendige Reaktion auf die praktische Herausforderung der GNSS-Ausfälle im Tunnel und sicherte erst die Validität der gesamten räumlichen Datenanalyse.

- **Berücksichtigung branchenspezifischer Randbedingungen:**

Die Arbeiten waren darauf ausgelegt, nicht nur die reine Funkleistung, sondern auch praktische Aspekte der Integration in die Bahninfrastruktur zu adressieren. Dieser praxisorientierte Ansatz war notwendig, um die Ergebnisse für Infrastrukturbetreiber und Industrie verwertbar zu machen.

4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Die Projektergebnisse der TU Chemnitz besitzen einen hohen wissenschaftlichen, technologischen und wirtschaftlichen Nutzen mit vielfältigen Verwertungspfaden:

Strategische Bedeutung und nationale Einzigartigkeit:

- Das Projekt „LCX4Rail“ bot die einzigartige Möglichkeit, eine LCX-FuE-Testinfrastruktur im realen Bahnumfeld zu entwickeln und zu validieren. Die lückenlose Bereitstellung von Kommunikationsdiensten für Schienenfahrzeuge ist zum einen eine zentrale Voraussetzung für attraktiven Schienenpersonenverkehr und legt zum anderen die Grundlage für automatisierte Betriebsverfahren im Bahnverkehr. Da klassische Vernetzungslösungen für die geografischen Anforderungen der Streckenführung (Täler, Tunnel) eine hohe Zahl an Basisstationen oder Repeatern erfordert hätten, stellte der Einsatz von LCX einen idealen Ansatzpunkt dar. LCX ermöglichen eine zuverlässige Funkversorgung entlang eines linienförmigen Korridors und erwiesen sich damit in besonderem Maße als geeignet für die topologischen Anforderungen im Bahnverkehr. Die Durchführung des Projekts stärkte den Zugang zu zukunftsweisenden Technologien und trug zur Innovationskraft im Bereich kritischer Infrastruktur bei.

- **Einmalige Testbedingungen:** Die Schaffung und der Betrieb des 5G-Testfeldes mit LCX-Kabeln unter realen Bahnbedingungen, insbesondere in Tunneln, stellten ein Alleinstellungsmerkmal dar.
- **Praxisnahe Forschung:** Die Tests unter realen Bedingungen im laufenden Bahnbetrieb sind ein unverzichtbarer Vorteil für die Entwicklung robuster, marktfähiger und skalierbarer Lösungen.
- **Beitrag zur Resilienz kritischer Infrastruktur:** Die gewonnenen Erkenntnisse trugen direkt zur Sicherheit und Zukunftsfähigkeit von Verkehrssystemen bei. Die validierte LCX-Technologie stellte sich als robuste Grundlage für die Kommunikation in sicherheitskritischen Bahnanwendungen heraus.

Wissenschaftlicher Nutzen und Verwertung:

- Die gewonnenen Erkenntnisse zur Leistungsfähigkeit von 5G über LCX unter Realbedingungen erweitern den wissenschaftlichen Stand der Technik im Bereich der drahtlosen Kommunikation für lineare Infrastrukturen.
- Der entwickelte Algorithmus zur GPS-Trajektorienkorrektur in GNSS-verweigerten Umgebungen stellt eine methodische Innovation dar, die in zahlreichen anderen Forschungsgebieten mit ähnlichen Herausforderungen (Tunnelbau, unterirdische Logistik, Indoor-Positioning) Anwendung finden kann.
- Die umfangreichen, qualitativ hochwertigen Messdatensätze (KPIs unter verschiedenen Szenarien) sind eine wertvolle Ressource für die weitere Forschung, z. B. zur Validierung von Ausbreitungsmodellen oder für Machine-Learning-Ansätze zur Netzoptimierung.
- Die Ergebnisse dienen als Grundlage für wissenschaftliche Publikationen.

Technologischer und wirtschaftlicher Nutzen sowie Verwertung:

- Die positiven Ergebnisse untermauern die **Technologieentscheidung** zugunsten von LCX als kosteneffiziente und leistungsstarke Infrastruktur für das kommende **Future Railway Mobile Communication System (FRMCS)**, den 5G-basierten Nachfolger von GSM-R. Dies liefert Planungssicherheit für Bahninfrastrukturbetreiber wie die Deutsche Bahn.
- Der Nachweis der **erweiterten Reichweite** (Coverage > Kabellänge) hat direkte wirtschaftliche Implikationen: Sie ermöglicht reduzierte Infrastrukturkosten, da weniger Kabelmeter oder Verstärker benötigt werden, um eine gegebene Streckenlänge abzudecken.
- Die Erkenntnisse zur **Robustheit** unter schwierigsten Bedingungen (Tunnel, Wetter, bewegte Lok) stärken das Vertrauen in die Betriebssicherheit und Verfügbarkeit von LCX-basierten Systemen, eine Grundvoraussetzung für den Einsatz in sicherheitskritischen Bahnanwendungen.
- Das gewonnene Know-how positioniert die TU Chemnitz und ihre Verbundpartner als **kompetente Ansprechpartner** für Folgeprojekte, Beratungsleistungen und die Weiterentwicklung der Technologie, z. B. in Richtung präzise Zugortung im Tunnel mittels 5G-Positioning-Referenzsignalen (PRS) über LCX.

5 Erfolge oder geplante Veröffentlichungen

Die Projektergebnisse der TU Chemnitz bilden eine solide Grundlage für mehrere wissenschaftliche Veröffentlichungen, die den Erkenntnisgewinn in die Fachcommunity tragen. Der aktuelle Stand ist wie folgt:

- **Angenommene Konferenzpublikation:**

Ein Beitrag mit dem Titel „Leaky Coaxial Cable Testbed for indoor Wireless Communication“ wurde zur Präsentation auf der 17. German Microwave Conference (GeMiC) 2026 (9.-11. März 2026, Karlsruher Institut für Technologie) angenommen.

- **Eingereichte Konferenzpublikation:**

Zwei wissenschaftliche Beiträge, die die systemischen Erkenntnisse sowie die KPI-Analyse der Feldmesskampagne vertiefen, wurden bei internationalen Fachkonferenzen eingereicht und befinden sich derzeit im Begutachtungsverfahren:

- a) Ein Beitrag wurde beim European Conference on Networks and Communications (EuCNC) & 6G Summit 2026 eingereicht.
- b) Ein Beitrag wurde zu einem Workshop zur Weiterentwicklung von Kommunikationstechnologien im Bahnsektor im Rahmen der IEEE VTC 2026 in Paris (Juni 2026) eingereicht.

- **Geplante weitere Veröffentlichungen:**

Über die genannten Konferenzbeiträge hinaus laufen die Vorbereitungen für zwei weitere wissenschaftliche Publikationen. Diese sollen vertiefende Analysen, insbesondere zur Methodik der GPS-Korrektur und zur vergleichenden Leistungsbewertung in verschiedenen Umgebungen, enthalten und für Einreichungen bei internationalen Fachzeitschriften oder Konferenzen vorgesehen sein.

- **Interne Wissenstransfer und Diskussion:**

Die Projektergebnisse und -fortschritte wurden im Rahmen von zwei Vorträgen vor allen Mitarbeitenden der Professur für Nachrichtentechnik präsentiert. Dies diente der internen Diskussion, der Schärfung der Forschungsfragen und der Verbreitung des gewonnenen Wissens innerhalb der Arbeitsgruppe.