Kurzbericht zum Teilvorhaben LCX4Rail FKZ: 03WIR1220C

Aufgabenstellung und wissenschaftlicher und technischer Stand

Die fortschreitende Digitalisierung des Eisenbahnverkehrs führt zu einem steigenden Bedarf an leistungsfähigen, zuverlässigen und skalierbaren Kommunikationsinfrastrukturen entlang von Bahnstrecken. Anwendungen wie digitale Betriebsführung, automatisierte Verkehrssysteme, funkbasierte Ortungsverfahren oder sicherheitsrelevante Sensortechnologien erfordern eine stabile Funkversorgung auch in infrastrukturell anspruchsvollen Umgebungen. Konventionelle Mobilfunklösungen stoßen insbesondere in Tunneln, Engstellen oder abgeschirmten Streckenabschnitten häufig an technische und wirtschaftliche Grenzen, da deren Realisierung mit erheblichem infrastrukturellem Aufwand verbunden ist. Eine alternative Technologie stellt der Einsatz von Leckwellenleiterkabeln (Leaky Coaxial Cable, LCX) dar. Diese speziellen Koaxialkabel verfügen über einen geschlitzten Außenleiter, der eine kontinuierliche Abstrahlung elektromagnetischer Signale entlang des Kabelverlaufs ermöglicht. LCX-Systeme werden bereits in bestimmten Tunnelanwendungen eingesetzt, besitzen jedoch ein weitergehendes Anwendungspotenzial im Eisenbahnumfeld, das bislang nur begrenzt untersucht wurde. Vor diesem Hintergrund adressiert das Projekt LCX4Rail die technische und infrastrukturelle Machbarkeit einer LCX-basierten Funkinfrastruktur entlang von Bahnstrecken. Ziel des Projekts war die systematische Untersuchung der Einsatzmöglichkeiten von LCX-Technologie im Schienenverkehr. Der Fokus lag dabei auf der Analyse technischer Rahmenbedingungen, infrastruktureller Anforderungen sowie regulatorischer Aspekte.

Für die MRK Media AG ergaben sich daraus insbesondere zwei zentrale Aufgabenbereiche. Zum einen umfasste dies die Planung, Installation und technische Untersuchung einer LCX-basierten Testinfrastruktur entlang einer realen Bahnstrecke. Zum anderen erfolgte eine detaillierte Analyse der rechtlichen und regulatorischen Rahmenbedingungen für Kabelinstallationen im Eisenbahninfrastrukturnetz. Zur strukturierten Bearbeitung der Forschungsfragen wurde das Projekt in mehrere miteinander verknüpfte Arbeitspakete gegliedert. Diese umfassten die technische Planung der LCX-Infrastruktur, simulationsbasierte Funknetzplanung, infrastrukturelle Untersuchungen zur Kabelverlegung, die Analyse möglicher Backbone-Anbindungen sowie eine rechtliche Rahmenanalyse.

Ablauf des Vorhabens und Ergebnisse

Im Rahmen der technischen Planung wurden in Abstimmung mit den Anforderungen der Technischen Universität Dresden (TUD) und der Technischen Universität Chemnitz (TUC) zunächst geeignete Streckenabschnitte für eine experimentelle LCX-Installation identifiziert. Zwei potenzielle Standorte im Raum Annaberg-Buchholz wurden analysiert: ein Tunnelabschnitt zwischen den Haltepunkten Annaberg-Buchholz Mitte und Annaberg-Buchholz Süd sowie ein Bereich im Umfeld des Bahnhofs Annaberg-Buchholz unterer Bahnhof. Nach umfangreichen Abstimmungsprozessen mit dem Infrastrukturbetreiber wurde der Bahnhofsstandort verworfen, da dort aufgrund erhöhter betrieblicher Anforderungen, komplexer Genehmigungsverfahren und höherer Kosten keine Umsetzung innerhalb der Projektlaufzeit möglich gewesen wäre. Der Tunnelabschnitt mit angrenzender Freistrecke wurde daher als Versuchsstandort ausgewählt.

Für die Funknetzplanung wurden grundlegende Ausbreitungseigenschaften von LCX-Systemen im Bahnumfeld untersucht und verschiedene Ausbreitungsmodelle verglichen. Dabei erwies sich das Dominant-Path-Modell als besonders geeignet, da es neben direkten Signalpfaden auch Reflexionseffekte berücksichtigt. In einer zweiten Phase wurden detaillierte dreidimensionale Modelle der untersuchten Streckenabschnitte erstellt. Diese basierten auf Punktwolken, die im Rahmen von Vor-Ort-Begehungen aufgenommen wurden. Die Modelle

wurden mit realistischen Materialparametern versehen und anschließend in die Simulationsumgebung integriert. Die Simulationsergebnisse der von der TUD und TUC angegebenen Funkstandards und Frequenzen bestätigten grundsätzlich die Eignung der untersuchten Standorte für eine LCX-basierte Funkversorgung. In einer weiteren Phase wurden verschiedene Verlegearten analysiert, darunter Installationen auf oder in Kabelkanälen, am Schienenfuß, in der Gleismitte sowie an Tunnelwand oder Tunneldecke. Die Ergebnisse zeigen, dass eine stabile Funkversorgung mit 5G und BLE entlang der Strecke grundsätzlich realisierbar ist. Einschränkungen ergeben sich jedoch bei UWB-Anwendungen, da regulatorische Beschränkungen der maximal zulässigen Sendeleistung zu Versorgungslücken führen können. Darüber hinaus zeigte sich, dass die Position der Empfangsantenne am Zug einen wesentlichen Einfluss auf die Signalqualität besitzt. Während für reine Datenkommunikation sowohl Dach- als auch Unterseitenantennen geeignet sind, erfordern präzise Ortungsverfahren in der Regel eine direkte Sichtverbindung zwischen Sender und Empfänger.

Die LCX-Testumgebung konnte im März 2025 während einer Streckensperrung errichtet werden. Die realisierte LCX-Installation erstreckt sich über eine Gesamtlänge von etwa 130 Metern, davon rund 21 Meter innerhalb des Tunnelbereichs. Das System wurde in drei Kabelsegmente unterteilt, um Montage, Wartung und gegebenenfalls erforderliche Austauschmaßnahmen zu erleichtern. Die Installation erfolgte entlang eines aufgeständerten Glasfaser-Kunststoff-Kabelkanals, der als Trägerstruktur dient. Die aktive Einspeisetechnik wurde in einem Schaltschrank außerhalb des Bahngeländes auf städtischem Grund installiert. Diese Standortwahl ermöglicht Wartungs- und Servicearbeiten ohne betriebliche Einschränkungen des Bahnverkehrs. Die Energieversorgung der Anlage wurde über eine oberirdische Stromzuführung aus der lokalen Infrastruktur realisiert. Parallel hierzu wurden Infrastrukturuntersuchungen durchgeführt. Die infrastrukturellen Untersuchungen bewerteten verschiedene Kabelverlegearten hinsichtlich Montageaufwand, Wartungszugänglichkeit sowie mechanischer und klimatischer Belastungen. Außenliegende Installationen sind einfacher zugänglich und leichter zu montieren, jedoch stärker Umwelt-einflüssen ausgesetzt. Innenliegende Installationen bieten besseren Schutz, erschweren jedoch Wartung und Instandhaltung. Zusätzlich wurden Alterungs- und Verschleißmechanismen betrachtet. Maßgebliche Einflussfaktoren sind UV-Strahlung, Temperaturschwankungen, mechanische Belastungen und Ablagerungen. Die Lebensdauer hochwertiger Koaxialkabel im Außenbereich liegt typischerweise zwischen drei und fünfzehn Jahren, wobei erste Alterungseffekte bereits nach wenigen Jahren auftreten können und regelmäßige Inspektionen erforderlich sind.

Die rechtliche Analyse zeigte, dass Kabelinstallationen im Eisenbahninfrastrukturnetz strengen regulatorischen Vorgaben unterliegen. Insbesondere aufgeständerte Kabelführungssysteme aus Kunststoff sowie Schienenfußkabel sind durch aktuelle DB-Richtlinien stark eingeschränkt oder für Neubauten grundsätzlich ausgeschlossen. Für Funkkabel existieren derzeit nur begrenzte Regelungen, wobei deren Einsatz insbesondere in Tunneln zulässig ist, sofern eine offene Verlegung technisch erforderlich ist. Anwendungen außerhalb von Tunneln wären hingegen nur im Rahmen von Ausnahmegenehmigungen oder nach Anpassung bestehender Regelwerke möglich.