

Kurzstudie

Mobilfunk am Gleis

Lineare Mobilfunkversorgungsinfrastruktur entlang
von Hochgeschwindigkeitsbahnstrecken



Erstellt im Auftrag des Bundesministeriums
für Digitales und Staatsmodernisierung

durch die aconium GmbH

aktualisierte Auflage Mai 2026

Autoren: Benjamin Beyer | Eike Gutt | Andreas Schröder



Impressum

aconium GmbH

Friedrichstraße 102 | 10117 Berlin
E-Mail: info@aconium.eu | Fon: +49 30 22183-0
www.aconium.eu

Tim Brauckmüller | Geschäftsführer
AG Berlin Charlottenburg | HRB 111699

Stand: Mai 2026

Einführung

Zu dieser Studie

Zu den größten technischen und wirtschaftlichen Herausforderungen im Mobilfunk gehört eine lückenlose Versorgung der Bahnreisenden mit leistungsfähigem Mobilfunk – insbesondere bei Reisegeschwindigkeiten von 200 km/h und schneller. Der Bedarf an Bandbreite sowie die Erwartungen an eine stabile, unterbrechungsfreie und hochleistungsfähige Mobilfunkverbindung sind hoch. Viele Fahrgäste wollen die Reisezeit bereits heute für geschäftliche Zwecke nutzen, etwa für Telefon- oder Video-Konferenzen. Ähnliches gilt für privat Reisende: Sie streamen im Zug Musik, Filme und Serien oder spielen Online-Games. Auch zukünftige Anwendungen wie Virtual oder Augmented Reality sollten auf Bahnreisen nutzbar sein.

Shared Medium:
Alle Nutzenden teilen sich die zur Verfügung stehende Bandbreite in einer Mobilfunkzelle.

3rd Generation Partnership Project (3GPP):
3gpp.org

Beim Mobilfunk handelt es sich um ein sogenanntes Shared Medium. Vor diesem Hintergrund und dem (umwelt-)politischen Streben, die Anzahl der Bahnreisenden stetig zu steigern, ist davon auszugehen, dass künftige Datenübertragungsraten im Gigabitbereich und insbesondere niedrige Latenzen erforderlich sein werden. Diese lassen sich nur mit 5G im Frequenzbereich von 3,6 GHz und höher erreichen und bilden die Grundlage, um die künftigen Bedarfe und Anforderungen der Bahnreisenden an eine adäquate Mobilfunkversorgung im Bahnverkehr zu erfüllen.

Die vorliegende Kurzstudie wirft einen Blick darauf, wie ein zukünftiges Mobilfunknetz entlang der Bahntrassen aussehen müsste, um eine hochkapazitive Versorgung der Fahrgäste im Gigabitbereich sicherzustellen. Dabei wird von der Hypothese ausgegangen, dass derartige Mobilfunkgeschwindigkeiten nur mittels einer linearen Mobilfunkinfrastruktur entlang der Gleise möglich sind. Zunächst wird kurz der Status Quo der Versorgungssituation entlang der

Bahnstrecken dargestellt. Anschließend wird eine Recherche zu möglicherweise vorhandenen und vergleichbaren Versorgungsinfrastrukturen in anderen Ländern durchgeführt, die geeignet sind, um die Hypothese zu überprüfen. Dabei werden bevorzugt Länder untersucht, in denen Hochgeschwindigkeitszüge verkehren oder in denen eine linienförmige Versorgung von Bahnstrecken bereits ansatzweise realisiert wurde. Zudem werden in einem Exkurs Beispiele von Testvorhaben gezeigt, die öffentliche Mobilfunknetze für bahnbetriebliche Belange wie die zukünftigen FRMCS-Dienste einsetzen. Hierzu erfolgten ein Desk Research verfügbarer Dokumente und öffentlich zugänglicher Quellen sowie Experteninterviews.

Anschließend werden theoretische Konzepte erörtert, die Ansätze für eine technische Ausgestaltung unterbreiten. Dazu werden unter anderem Vorschläge des 3rd. Generation Partnership Project herangezogen.

Abschließend wird aufgezeigt, welche wirtschaftlichen Aspekte beim Aufbau einer linearen Mobilfunkinfrastruktur berücksichtigt werden müssen. Dabei wird davon ausgegangen, dass eine hohe Anzahl an neuen Standorten entlang der Strecken benötigt wird, die sowohl hohe Investitions- als auch Betriebskosten verursacht. Es werden Maßnahmen vorgestellt, die geeignet sind, um die Kosten für einen wirtschaftlichen und effizienten Netzausbau maßgeblich zu minimieren.

Um einen möglichst umfassenden und aktuellen Stand der internationalen Vorhaben zur Mobilfunkversorgung entlang von Bahntrassen zu geben, wurde die hier vorliegende Fassung der Kurzstudie im Mai 2026 unter Berücksichtigung der Länderfallstudien aktualisiert.

Inhalt

Einführung	Zu dieser Studie	3
1	Status Quo: Versorgungssituation entlang der Bahnstrecken	5
2	Mobilfunkprojekte in anderen Ländern	8
	2.1 Spanien	8
	2.1.1 Die Ausbauprojekte	9
	2.1.2 Technischer Aufbau	10
	2.2 Schweiz	17
	2.3 Japan	19
	2.4 China	20
	2.5 Österreich.	21
	2.6 Exkurs: Öffentliche Mobilfunknetze als Träger für FRMCS-Dienste.	22
	2.6.1 Schweden	23
	2.6.2 Finnland.	24
	2.7 Zwischenfazit.	26
3	Technische Herausforderungen für die Versorgung entlang von Hochgeschwindigkeitsbahntrassen mit Gigabitdatenraten	27
4	Vorschläge für einen wirtschaftlichen Betrieb eines Gigabitnetzes	31
	4.1 Passives Infrastruktur-Sharing	31
	4.2 Aktives Infrastruktur-Sharing	31
	4.3 Frequenzpooling	32
	4.4 Multi-Operator-Core-Network (MOCN)	33
	4.5 Regulatorische Grundlagen für Frequenzpooling	34
5	Weitere Handlungsempfehlungen	36
	Verzeichnisse	38

Kapitel 1

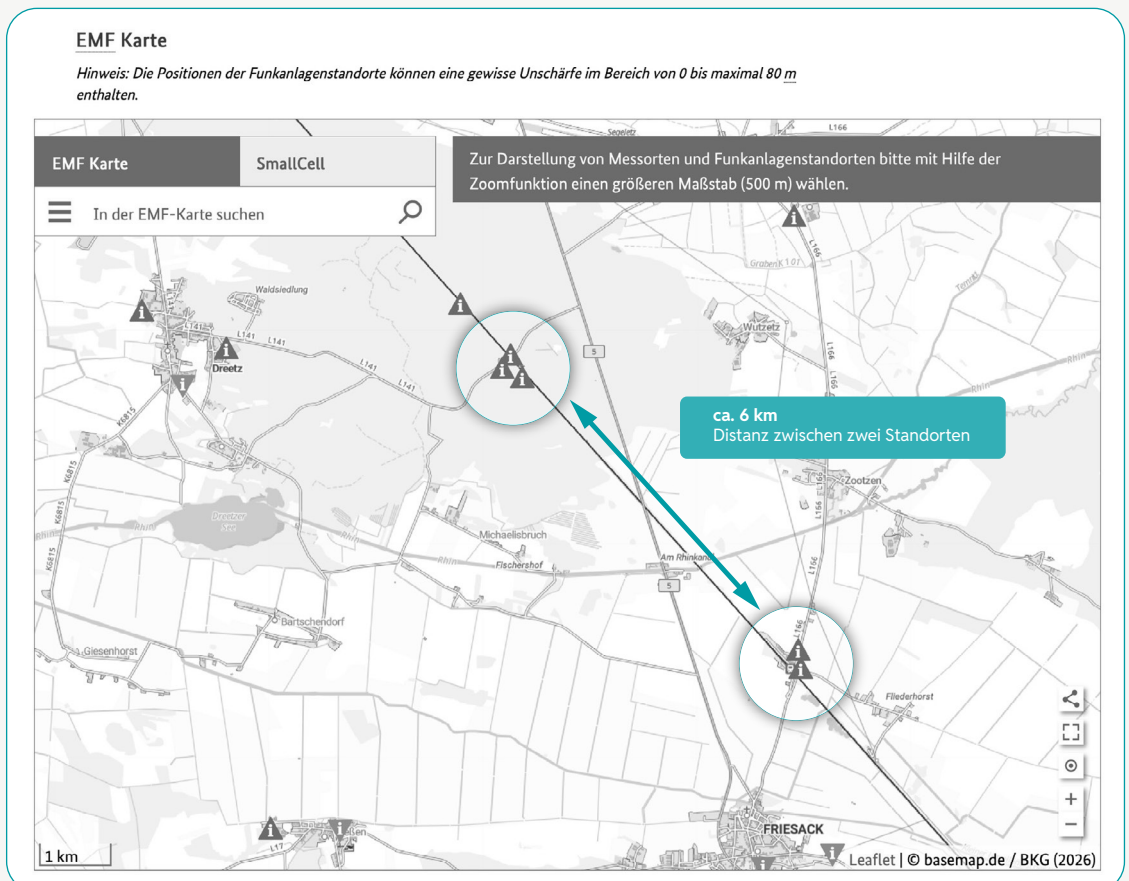
Status Quo: Versorgungssituation entlang der Bahn- strecken

Gemeinhin werden die Schienenwege durch die Flächenversorgung der Mobilfunknetzbetreiber (MNB) mitversorgt. Dafür stehen unter anderem in den Bereichen 700 MHz, 800 MHz und 900 MHz verschiedene Frequenzen zur Verfügung – ggf. unter Berücksichtigung des Schutzes ausländischer Netze oder des Spektrums benachbarter Funkdienste. Die Mobilfunkstandorte sind so gewählt, dass sie eine möglichst große Fläche und speziell dicht besiedelte Gebiete versorgen. Die Bahntrassen als linienförmige Korridore verfügen in Deutschland über keine speziell an die Herausforderungen der Versorgung der Bahnreisenden angepasste passive oder aktive Mobilfunkinfrastruktur. Die Mitversorgung durch Mobilfunkstandorte in der Fläche führt dazu, dass große Teile der Bahnstrecken mehrere Kilometer vom nächsten Mobilfunkstandort entfernt liegen (vgl. Abb. 1).

Abbildung 1:

Teile der Bahnstrecken (hier ein Teilstück zwischen Berlin und Hamburg) sind nur sehr schlecht mit Mobilfunk versorgt. Das liegt unter anderem an zu großen Distanzen zwischen den Standorten. Um diese Entfernungen zu überwinden, müssen Frequenzen unter 1 GHz eingesetzt werden, die jedoch nur vergleichsweise geringe Datenraten ermöglichen.

Quelle: EMF-Karte der BNetzA (eigene Bearbeitung)



Die schlechte und in Teilen nicht vorhandene Mobilfunkversorgung hat dazu geführt, dass den MNB im Rahmen der Frequenzversteigerung 2019 Versorgungsaufgaben für Bahnstrecken erteilt wurden. Sie sehen vor, dass fahrgaststarke Bahnstrecken mit mindestens 100 Mbit/s, Nebenstrecken mit 50 Mbit/s pro Sektor versorgt werden müssen. Im Rahmen der Verlängerung der Frequenznutzungsrechte in den Frequenzbereichen von 800 MHz, 1,8 GHz und 2,6 GHz im Jahr 2025 wurden keine weiteren dedizierten Versorgungsaufgaben für den Mobilfunkausbau an Bahntrassen ausgesprochen. Stattdessen wurden die Mobilfunknetzbetreiber zur Mitwirkung am Ausbau der Netze entlang der Schienenwege und zu entsprechenden Verhandlungen mit Eisenbahninfrastrukturunternehmen über deren gemeinsamen Nutzung aufgerufen.¹

Um die Versorgungsaufgaben aus dem Jahr 2019 zu erfüllen, wurden die Mobilfunknetze entlang der Bahntrassen zwar teilweise verdichtet, aber eine durchgehend leistungsstarke und stabile Versorgung ließ sich damit bislang nicht erreichen. Die Gründe dafür sind:

Die gängige Bauart der ICEs mit metallbeschichteten Scheiben sorgt für eine hohe Dämpfung des Mobilfunksignals, sodass die Versorgung der Reisenden in den Zügen nicht erreicht wird.

Teilweise fehlen Liegenschaften für neue Standorte, um eine durchgehende Versorgung zu gewährleisten.

Das 900 MHz-Frequenzband konnte bis Ende des Jahres 2024 nur sehr eingeschränkt bzw. gar nicht für die Mobilfunkversorgung der Bahngäste genutzt werden, da der Bahnfunk GSM-R ebenfalls Frequenzen im 900 MHz-Band nutzt. Die Nähe von Frequenzen auf diesem Band kann dazu führen, dass der Bahnfunk gestört wird. Um Störungen auszuschließen, dürfen die MNB in einem Korridor von 8 km um die Bahngleise

(jeweils 4 km rechts und links des Gleises) keine LTE-Signale ausstrahlen.

Doch selbst ohne diese Einschränkungen ist die angestrebte Versorgung mit 100 Mbit/s nicht ausreichend, wenn man berücksichtigt, dass ein ICE 4 je nach Zuglänge 444 bis 918 Sitzplätze bietet.² Mobilfunk ist ein Shared Medium, was bedeutet, dass die Reisenden sich die bereitgestellte Bandbreite teilen müssen. Bei angenommenen 500 Nutzenden und 100 Mbit/s verbleibt rechnerisch eine Bandbreite von lediglich 0,2 Mbit/s pro Nutzendem und das auch nur unter der Voraussetzung, dass die 100 Mbit/s auch tatsächlich im Zug ankommen.

Ein Zug verhält sich wie ein faradayscher Käfig und schirmt sein Inneres vor elektromagnetischen Wellen ab. So entsteht eine Dämpfung von bis zu 30 dB, was einer Signalabschwächung von 99,9 % entspricht.³ Als Herausforderung haben sich die metallbeschichteten Fenster erwiesen, die maßgeblich für den hohen Pfadverlust verantwortlich sind. Zwar wurden inzwischen Lösungen entwickelt, um dieses Problem zu beheben, jedoch sind sie noch nicht weit verbreitet. So können bestehende metallbeschichtete Fenster gelasert werden, wodurch die Metallbeschichtung wabenförmig entfernt wird. Die Wärmeschutzfunktion bleibt dadurch weitestgehend erhalten, die Signaldämpfung verringert sich jedoch erheblich und die Scheiben werden weitgehend durchlässig für Mobilfunk. Messungen haben gezeigt, dass die Durchlässigkeit mit steigender Frequenz abnimmt. Bei 3,6 GHz liegt eine Dämpfung von ca. 10 dB vor, was einer Abschwächung um 90 % entspricht.⁴

Für eine Verbesserung der Internetversorgung werden ICEs zum Teil mit Mobilfunkempfängern ausgerüstet, die über Repeater das Mobilfunksignal in das Innere des Zuges weiterleiten. In den Zügen werden WLAN-Hotspots installiert, damit auch Reisende das Internet nutzen können, deren Endgeräte nur WLAN-Empfang

1 Vgl.: Bundesnetzagentur, Bundesnetzagentur verlängert Mobilfunkfrequenzen unter Auflagen, <https://www.bundesnetzagentur.de/1053942>, zuletzt abgerufen am 13.04.2026.

2 Vgl.: Deutsche Bahn, Der ICE 4: das Rückgrat der dB-Fernverkehrsflotte, https://www.deutschebahn.com/de/presse/suche_Medienpakete/medienpaket_ice4-6854650, zuletzt abgerufen am 13.04.2026.

3 Vgl.: Vogel, M., Rollende Hotspots, <https://pro-physik.de/zeitschriften/download/12775>, zuletzt abgerufen am 13.04.2026.

4 Vgl.: Schmücke M., Verbesserter Mobilfunkempfang durch frequenzdurchlässige Seitenscheiben in der Kosten-Nutzen-Betrachtung, <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uid:b21d49b9-7974-4856-839c-85805ba5097d/ZEV-8-2021-Siemens-Schmucke.pdf>, S. 280, zuletzt abgerufen am 13.04.2023.

haben, z. B. Tablets und Laptops.⁵ Der Vorteil dieses Ansatzes ist, dass jeweils das Netz des am besten versorgenden Anbieters genutzt werden kann. Darüber hinaus wurden über ein Förderprogramm des Bundes die bestehenden GSM-R-Funkmodule durch moderne „störfeste“ GSM-R-Module in den Lokomotiven getauscht.⁶ Die neuen Module verhindern, dass LTE-Signale der Mobilfunknetzbetreiber den Bahnfunk stören und ermöglichen so die volle Nutzung von LTE900 am Gleis. Dadurch konnte der Durchsatz an den Bahnstrecken über die Aktivierung des LTE-900-MHz-Bandes durch die Mobilfunknetzbetreiber um rund 50 Mbit/s pro Standort erhöht werden. Infolgedessen aktivierte bspw. der Anbieter Telefónica o2 an rund 10.000 Standorten erstmals LTE auf 900 MHz.⁷

Um die Versorgung an Bahnstrecken zu verbessern unternehmen auch die Netzbetreiber Anstrengungen, die teilweise über die Versorgungsaufgaben hinausgehen. 2021 haben sich die Deutsche Bahn und die Deutsche Telekom auf eine Übererfüllung der Versorgungsaufgaben geeinigt. Demnach wollte die Deutsche Telekom Hauptverkehrsstrecken (insgesamt 7.800 km) bis Ende 2024 sowie weitere 13.800 km fahrgaststarker Strecken (> 2.000 Fahrgäste/Tag) bis Ende 2025 mit mehr

als 200 Mbit/s versorgen. Alle sonstigen Strecken will die Deutsche Telekom bis Ende 2026 mit einer Datenrate von mehr als 100 Mbit/s versorgen. Dazu will sie bis dahin rund 800 neue Mobilfunkstandorte in Betrieb nehmen und die Kapazität an mehreren hundert Standorten erweitern. Die Deutsche Bahn stellt hierfür Grundstücke, Glasfaseranschlüsse, Flächen auf Gebäuden und an Mobilfunkmasten bereit. Die Bilanz zwei Jahre nach Start: Auf 97 % der Hauptverkehrsstrecken steht LTE mit 200 Mbit/s zur Verfügung. Dafür hat die Deutsche Telekom rund 300 Mobilfunkmasten neu gebaut, sowie 700 bestehende Funkstandorte modernisiert oder erweitert.⁸

2022 haben auch Vodafone und die Deutsche Bahn eine Übererfüllung der Versorgungsaufgaben beschlossen. Bis Mitte 2025 sollten 7.800 km Hauptverkehrsstrecken durchgängig mit mindestens 225 Mbit/s im LTE-Netz versorgt werden. Auf weiteren 13.800 km fahrgaststarker Strecken sollte bis Sommer 2025 ein lückenloses LTE-Netz mit mind. 125 Mbit/s realisiert werden. Die Hauptverkehrsstrecken sollten bis 2025 zudem mit 1.800 MHz-Frequenzen versorgt werden, um den Fahrgästen 5G anzubieten.⁹

Die Verdichtung der Standorte, der Umbau der Züge sowie der Austausch der ungehärteten Endgeräte bewirken zwar eine Verbesserung der Versorgung – Gigabitgeschwindigkeiten lassen sich damit dennoch nicht erreichen.

5 Vgl.: Vogel, M., Rollende Hotspots, <https://pro-physik.de/zeitschriften/download/12775>, zuletzt abgerufen am 13.04.2026.

6 Vgl.: Bundesministerium für Digitales und Verkehr, Bessere Mobilfunkversorgung an Bahnstrecken, <https://www.bmv.de/Shared-Docs/DE/Artikel/E/umruestung-mobilfunk-bahnstrecken.html>, zuletzt abgerufen am 13.04.2026.

7 Vgl.: Telefónica Deutschland, O2 Telefónica aktiviert zusätzliche Netzkapazitäten an 10.000 Mobilfunkstandorten, <https://www.telefonica.de/news/corporate/2025/08/besseres-netz-fuer-bahnreisende-o2-telefonica-aktiviert-zusaetzliche-netzkapazitaeten-an-10-000-mobilfunkstandorten.html>, zuletzt abgerufen am 13.04.2026.

8 Deutsche Telekom, Deutsche Bahn und Telekom beim lückenlosen Mobilfunkausbau entlang der Schiene vor Plan, <https://www.telekom.com/de/medien/medieninformationen/detail/handynetz-fuer-zugreisende-verbessert-1040366>, zuletzt abgerufen am 13.04.2026.

9 Deutsche Bahn, Vodafone und Deutsche Bahn schließen Funklöcher an Schienenstrecken, https://www.deutschebahn.com/de/presse/pressestart_zentrales_uebersicht/Vodafone-und-Deutsche-Bahn-schliessen-Funkloecher-an-Schienenstrecken-7567342, zuletzt abgerufen am 13.04.2026.

Kapitel 2

Mobilfunkprojekte in anderen Ländern

Im folgenden Kapitel werden internationale Beispiele und Ansätze zur Verbesserung der Mobilfunkversorgung entlang von Bahnstrecken betrachtet. Ziel ist es, erfolgreiche Maßnahmen und Strategien aus anderen Ländern aufzuzeigen, die dazu beitragen können, die Mobilfunkversorgung für Bahnreisende nachhaltig zu verbessern und mögliche Ansatzpunkte für zukünftige Entwicklungen abzuleiten.

2.1 Spanien

Im Konjunkturprogramm Spaniens ist vereinbart, den Ausbau einer 5G-Infrastruktur auf fünf in Bau befindlichen Hochgeschwindigkeitsstrecken finanziell zu unterstützen. Daran beteiligte Unternehmen sind Ericsson, Huawei, Orange und Vodafone, die jeweils für verschiedene Strecken verantwortlich sind. Das geschätzte Gesamtbudget beträgt rund 117,3 Mio. €. Die Vorhaben werden über das EU-Programm Next Generation EU und mit Mitteln der Recovery and Resilience Facility (RRF) unterstützt. Im Rahmen der Maßnahme, die die Digitalisierung und Effizienz des spanischen Eisenbahnsystems weiter vorantreiben wird, soll die Netzinfrastuktur ausgebaut werden, um die 5G-Abdeckung der Mobilfunknetzbetreiber zu unterstützen und hochwertige Sprach- und Datendienste in den betreffenden Gebieten zu gewährleisten. Konkret sollen Antennenkorridore an den Bahnstrecken gebaut werden, die ausdrücklich für die Versorgung der Bahnreisenden mit Mobilfunk konzipiert werden. Der Betreiber des spanischen Schienennetzes und der Bahnhöfe, Administrador de Infraestructuras Ferroviarias (Adif), fungiert dabei als eine Art Tower Company (Neutral Host-Konzept), die sowohl das passive als auch das aktive Equipment bereitstellt und den Mobilfunknetzbetreibern gegen Entgelt zur Verfügung stellt. Die Mobilfunknetzbetreiber versorgen über RAN-Sharing die Kund:innen in den Zügen. Das Sharing beschränkt sich dabei

ausschließlich auf die gemeinsame Nutzung aller Komponenten. Ein weitreichenderes Pooling von Frequenzen ist in dem Vorhaben hingegen nicht vorgesehen. Zudem werden ausschließlich Frequenzen unterhalb von 1 GHz (700 und 800 MHz) eingesetzt, sodass die Versorgung mit leistungsfähigem Mobilfunk (4G und 5G) im Vordergrund steht – nicht jedoch die Gigabitversorgung.

Zum Zeitpunkt der ersten Studiererstellung im Oktober 2023 waren nur diese sehr vereinzelt Informationen zu den Bauvorhaben in Spanien öffentlich verfügbar. Zu Beginn des Jahres 2025 wurde aconium durch das Bundesministerium für Digitales und Staatsmodernisierung (BMDS) beauftragt, weitergehende Informationen zu dem vielversprechenden Ansatz in Spanien zu recherchieren.

Öffentlich zugängliche Informationen zu den Ausbauprojekten sind weiterhin nur in sehr begrenztem Umfang verfügbar, sodass die Autoren der Studie neben der Einsicht in die Vergabeunterlagen überwiegend auf Aussagen von am Projekt beteiligten Interviewpartnern angewiesen waren. Es hat sich auch gezeigt, dass die Projekte einer gewissen (Markt-)Dynamik unterliegen, sodass sich im Zeitablauf durchaus Änderungen gegenüber den ursprünglich ausgeschriebenen Vorgaben

ergeben können. So wurde zum Beispiel Vodafone Spanien inzwischen an die Zegona Communications verkauft, wobei der Markenname „Voda-fone“ noch etwa acht Jahre weiterverwendet werden darf. Ob der Verkauf Auswirkungen auf die Fortsetzung des von Vodafone gewonnenen Loses hat, lässt sich zu diesem Zeitpunkt nicht abschließend bewerten. Derzeit spricht allerdings einiges dafür, dass sich keine gravierenden Änderungen ergeben.

2.1.1 Die Ausbauprojekte

Der Ausbau ist in insgesamt fünf Strecken und drei Lose geteilt, um das bestehende Netz zu ergänzen (vgl. Abbildung 2). Die Strecken von Albacete nach Alicante und von Barcelona nach Figueres (Los 3) baut Vodafone gemeinsam mit dem Bauunternehmen Sociedad Española de Empresas Industriales (SEMI) aus. Der Vertrag

läuft über fünf Jahre und umfasst 25,5 Mio. €.¹⁰ Das Unternehmen SEMI ist verantwortlich für die Planung und den Bau der passiven Infrastruktur. Vodafone und Ericsson errichten die aktiven Netzelemente. Ericsson España (Ericsson) installiert die Netzwerkkomponenten, während Vodafone ihr 700 MHz- und 800 MHz-Frequenzspektrum zur Verfügung stellt. Der Aufbau sollte laut Vereinbarung bis Dezember 2025 abgeschlossen werden. Im Anschluss werden die Infrastrukturen für drei Jahre gewartet.

Die Lose 1 und 2 – und damit das größere Volumen – hat das Unternehmen Orange gewonnen. Der Vertrag umfasst 86,4 Mio. €.¹¹ Wie Vodafone wird auch Orange mit Ericsson zusammenarbeiten. Orange zeichnet sich für die 5G-Versorgung der Strecken Plasencia-Cáceres-Badajoz und Granada-Antequera sowie für den Korridor zwischen Olmedo und Ourense verantwortlich.

Abbildung 2:
Darstellung der Lose
mit den jeweiligen
Ausbaustrecken.

Quelle: Eigene
Darstellung.



¹⁰ ADIF selbst gibt ein Investitionsvolumen von 30,9 Mio. € an: Adif Alta Velocidad, Adif AV invierte 117,3 M€ en el despliegue de la tecnología 5G en líneas de alta velocidad, <https://www.adif.es/w/adif-av-invierte-117-3-m€-en-el-despliegue-de-la-tecnología-5g-en-líneas-de-alta-velocida>, zuletzt abgerufen am 13.04.2026. Der Unterschied ergibt sich möglicherweise durch den Einbezug eines Eigenanteils.

¹¹ Vgl.: Adif Alta Velocidad, Adif AV invierte 117,3 M€ en el despliegue de la tecnología 5G en líneas de alta velocidad, <https://www.adif.es/w/adif-av-invierte-117-3-m€-en-el-despliegue-de-la-tecnología-5g-en-líneas-de-alta-velocida>, zuletzt abgerufen am 13.04.2026.

Tabelle 1:
Aufteilung der drei
Ausschreibungslose.

Los	Hochgeschwindigkeitsstrecke	Länge in Kilometer	Bezuschlagtes Unternehmen
1	Plasencia-Cáceres-Badajoz	212	Orange/SISTEM
1	Antequera – Granada	121	Orange/SISTEM
2	Olmedo – Ourense	330	Orange/SISTEM
3	Albacete – Alicante	165	Vodafone Spanien /SEMI
3	Barcelona – Figueras	131	Vodafone Spanien /SEMI
Gesamtlänge in Kilometer		959	
Davon Tunnelkilometer		201	

Insgesamt werden ca. 959 km Strecke ausgebaut. Davon sind ca. 201 km Tunnelabschnitte, die ebenfalls mit Mobilfunk versorgt werden. Der technische Aufbau und die Rollenverteilung unter den beteiligten Akteuren sind für alle drei Lose gleichermaßen vorgegeben. Wie anspruchsvoll der Mobilfunkausbau entlang der Bahnstrecken ist und unter welchen Voraussetzungen die Versorgung mit 5G erfolgen muss bzw. welche topografischen und streckenführungsbedingten Herausforderungen dabei zu berücksichtigen sind, zeigt das Beispiel der Strecke von Olmedo nach Ourense. Dieser Streckenabschnitt ist Teil der Hochgeschwindigkeitstrasse, die Madrid mit der Region Galicien verbindet. Die Züge können auf der Strecke mit einer Geschwindigkeit von bis zu 350 km/h fahren.

Die auszubauende Strecke unterteilt sich in drei Abschnitte: von Olmedo nach Zamora (ca. 95 km), von Zamora nach Pedralba de la Pradería (ca. 111 km) und von Pedralba de la Pradería nach Ourense (ca. 120 km). Alle drei Streckenabschnitte sind mit einer GSM-R-Basisversorgung ausgestattet. Herausfordernd für die Streckenerschließung mit 5G-Mobilfunk ist insbesondere der Abschnitt zwischen Zamora und Pedralba sowie der Folgeabschnitt weiter nach Ourense. Beide Streckenabschnitte verfügen über Tunnelbauanlagen, die gesondert mit Mobilfunk erschlossen werden müssen. Aufgrund der Lage im südlichen Teil des Kantabrischen Gebirges findet sich insbesondere im dritten Streckensektor bis Ourense eine Vielzahl von Tunnelanlagen, die sich durch unterschiedliche Bauformen wie bspw. Doppel- und

Einzelröhrenanlagen sowie Schlauchtunnel voneinander unterscheiden und somit auch dedizierte Anforderungen an die Versorgung mit Mobilfunk mit sich bringen. Besonders anspruchsvoll zeigen sich dabei vier jeweils über ca. 7 km lange Doppelröhrenbauten.

2.1.2 Technischer Aufbau

Der technische Aufbau aller fünf auszubauenden Hochgeschwindigkeitsstrecken entspricht einem Neutral-Host-Konzept. Das Funkzugangsnetz (auch Radio Access Network, RAN) wird nur einmal ausgebaut. Dadurch sind erhebliche Einsparungen bei Investitions- und Betriebskosten möglich. Alle Mobilfunknetzbetreiber haben die Möglichkeit, die Technik mit zu nutzen.

Das Mobilfunknetz, das entlang der fünf spanischen Hochgeschwindigkeitstrassen entsteht, wird für den Ausbau mit Low-Band-Frequenzen (700 und 800 MHz) konzipiert. Eine spätere Skalierung mit dem Einsatz höherer Frequenzen im Midband ist dabei technisch nicht ausgeschlossen, derzeit aber nicht Gegenstand des Ausbavorhabens. Die Abstände zwischen den Sendemasten betragen ca. 2,5 km, um eine unterbrechungsfreie Versorgung zu erreichen. Es wird auf bestehende GSM-R-Infrastruktur an den Bahnstrecken zurückgegriffen und zusätzlich werden neue Standorte gebaut. Diese werden vornehmlich auf Bodengrund des Betreibers Adif in direkter Nähe entlang der Bahntrassen errichtet.

Aufbau der passiven Infrastruktur

Die passive Infrastruktur besteht im Wesentlichen aus den Mobilfunkmasten und den dazugehörigen Bauten, die dem Schutz der Technik vor Umwelteinflüssen, Vandalismus und Diebstahl dienen, wie bspw. Umzäunungen und Technikschränke. Auch die Strom- und Glasfaseranbindung der Mobilfunkstandorte wird zur passiven Infrastruktur gezählt. Grundsätzlich verfolgt Adif das Ziel, bestehende passive Infrastrukturen für den Ausbau zu nutzen, um die Kosten zu reduzieren.

Sendemaste und Mobilfunkstandorte

Die Bestandsmasten und die neuen Standorte befinden sich ausschließlich auf Liegenschaften, die im Besitz von Adif sind. Die Standorte liegen überwiegend sehr nahe an den Schienen mit einem typischen Abstand von ca. 8 bis 10 m zu den Gleisen. Bei den Masten handelt es sich um unterschiedliche Arten von Sendemasten mit unterschiedlichen Höhen, die sich aus der Funknetzplanung ergeben. Es werden Gittermasten für höhere Standorte von 20 bis 40 m eingesetzt und Röhrenmasten für die niedrigeren Standorte mit Höhen von 2 bis zu 20 m errichtet.¹²

Die bestehenden GSM-R-Standorte werden unter der Voraussetzung mitgenutzt, dass sie einerseits in die Funknetzplanung integriert werden können, andererseits müssen auch die baulichen Voraussetzungen erfüllt sein, um zusätzliche Antennen und Remote Radio Heads (RRHs) aufzunehmen. Zudem gibt es einzelne, schon vor dem Projektstart von Adif für die Verbesserung der Mobilfunkversorgung errichtete Standorte, die von den Netzbetreibern bisher aber nicht genutzt wurden. Diese sollen ebenfalls in die Vorhaben integriert werden. Unter der Voraussetzung, dass eine Line of Sight (LoS) vorhanden ist, kann zwischen den Standorten eine Distanz von maximal ca. 2,5 bis 3 km liegen, um die funktechnischen Vorgaben einhalten zu können. Bei den Abständen wurde auch die mögliche Erweiterung um FRMCS zu einem späteren Zeitpunkt berücksichtigt. Es handelt sich somit um eine lineare Mobilfunkinfrastruktur direkt an den Hochgeschwindigkeitstrassen.

Die Mobilfunkstandorte differenzieren sich in zwei unterschiedliche Typen: Es gibt Standorte mit Baseband Unit (BBU) und welche, die nur über Radio Units (RRHs) verfügen. Für Standorte mit BBU (Cabinet-Standorte) sind neben dem eigentlichen Mobilfunkmast auch Schutzvorrichtungen für die Technik vorgesehen. Diese ist an den bestehenden GSM-R Standorten in der Regel vorhanden. Da etwa acht bis zehn RRHs von einer BBU versorgt werden, müssen am überwiegenden Teil der Standorte nur Radio Units und Antennen installiert werden.

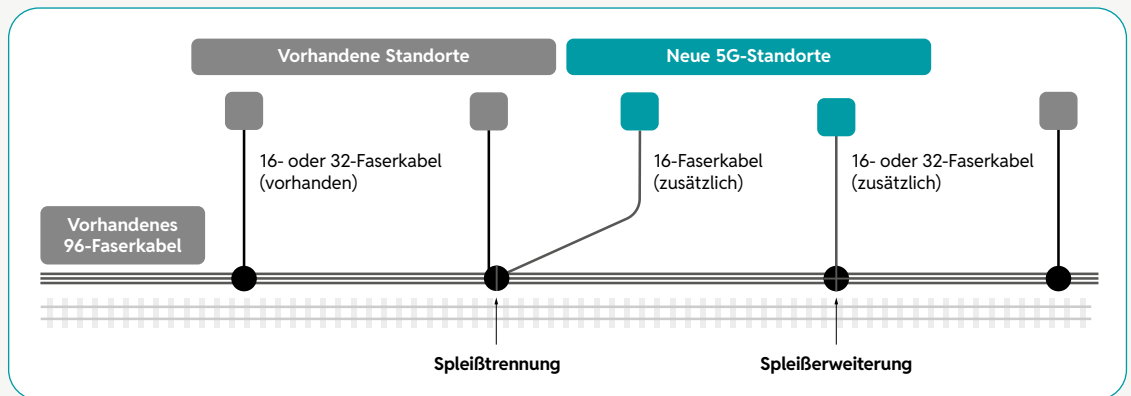
Strom und Glasfaserinfrastruktur

Die Anbindung der Technikschränke (Cabinet-Standorte), sowohl der Bestands- als auch der neu zu errichtenden Maststandorte, erfolgt weitestgehend über das bereits entlang der Bahntrasse bestehende Glasfasernetz der Adif. Dieses verfügt über ein 96-adriges Faserzugangskabel, über das die Verbindungen zu den einzelnen BBU-Racks und RRHs der Mobilfunknetzbetreiber hergestellt wird. Ebenso wird über dieses Hauptkabel der IP-Link zu den IP-Cores der Mobilfunknetze sowie des vorgelagerten Adif-IP-Netzes geführt.

Das Hauptkabel übernimmt somit sowohl die Funktion des Zugangsnetzes zu den Mobilfunkstandorten als auch die des Backhails, um eine Verbindung zum jeweils vorgelagerten Kernnetz herzustellen. Auf der Backhaul-Ebene befindet sich dazu jeweils an den Cabinet-Standorten ein Router mit ausreichender Verarbeitungsleistung von 10 Gbit/s, der mit der jeweiligen BBU verbunden ist, um den Datenverkehr der Netzbetreiber zu aggregieren und an die verschiedenen Core-Netze jedes Betreibers weiterzureichen. Zudem ist an den Cabinet-Standorten eine zusätzliche Firewall installiert, die die IP-Netze der Mobilfunknetzbetreiber von dem Kernnetz des Adif-IP-Netzwerkes logisch trennt, um so öffentliche und geschlossenen Netze voneinander autark betreiben zu können. Die einzelnen Bestands- bzw. Neubaustandorte werden von der Haupttrasse jeweils über einen 32- bzw. 16-Faser-Split abzweigend von der Haupttrasse erschlossen, um die Anbindung an die Router der BBU herzustellen (vgl. Abbildung 3).

Abbildung 3:
Verteilung der Glasfasern entlang der Bahnschienen.

Quelle: Eigene Darstellung



Ebenso finden 32- oder 16-Faser-Mehrkabelsysteme Verwendung, um bedarfsweise von den vorhandenen Anschlusskästen (Cabinets) oder Splits in den Schachttöffnungen an der Haupttrasse zusätzlich weitere Faseranbindungen zu den Masten an jedem Standort oder zu den Verteilern herzustellen oder als redundante Ersatzzuführung zur Anbindung der Standorte zu dienen.

Für Kommunikationssysteme externer Betreiber stehen noch acht weitere Fasern zur Verfügung, die zugleich eine Redundanz für das Netzwerk der RRH- und BBU-Anbindung untereinander liefern sollen. In den Tunneln wird zudem aus Platzgründen in einigen Anschlussvarianten mit optischen Splitttern gearbeitet, um eine Trennung der Netzwerke aus Platzgründen auf weniger Fasern vollziehen zu können.

Am Beispiel der Hochgeschwindigkeitsstrecke von Olmedo nach Ourense wird anhand der ausgeschriebenen Materialliste ersichtlich, dass für die Glasfaseranbindung der Strecke weitestgehend auf bereits vorhandene Adif-Infrastruktur zurückgegriffen werden kann und nur wenige Abschnitte neu mit Glasfasertrassen konfektioniert werden müssen. Die Gesamtstrecke beträgt rund 330 km Bahntrasse. In der Budgetliste der Ausschreibungsunterlagen werden jedoch nur ca. 219 km Glasfasern zur Beschaffung ausgewiesen. Diese neu zu errichtenden Glasfaserstrecken umfassen aber auch insbesondere ergänzende Trassenführungen bzw. die von der bestehenden 96-Faser-Bestandstrasse ableitenden Installationen hin zu der aktiven Technik in den Cabinets. So wird es sinngemäß in der Leistungsbeschreibung zu der Ausbaumaßnahme formuliert.

Für das Mobilfunknetz wird eine neue 750 Volt-Stromleitung gelegt. Diese verläuft entlang der Strecke immer von den Gebäuden und Shaltern ausgehend jeweils zu den Mobilfunkstandorten. Dabei werden jeweils vier 750 Volt-Leitungen parallel verlegt. In den Maschinenräumen der Standorte sind dabei jeweils die zugehörigen Transformatoren untergebracht. Zusätzlich wird eine Notstromversorgung die Ausfallsicherheit erhöhen.

Netzarchitektur und RAN-Topologie

Das Funkzugangsnetz (Radio Access Network, RAN) ist ein aktiver Bestandteil des Mobilfunknetzes. Zentrale Komponenten sind die BBU, die Antennen und die RRHs, um die Funkverbindung zu den mobilen Endgeräten aufzubauen.

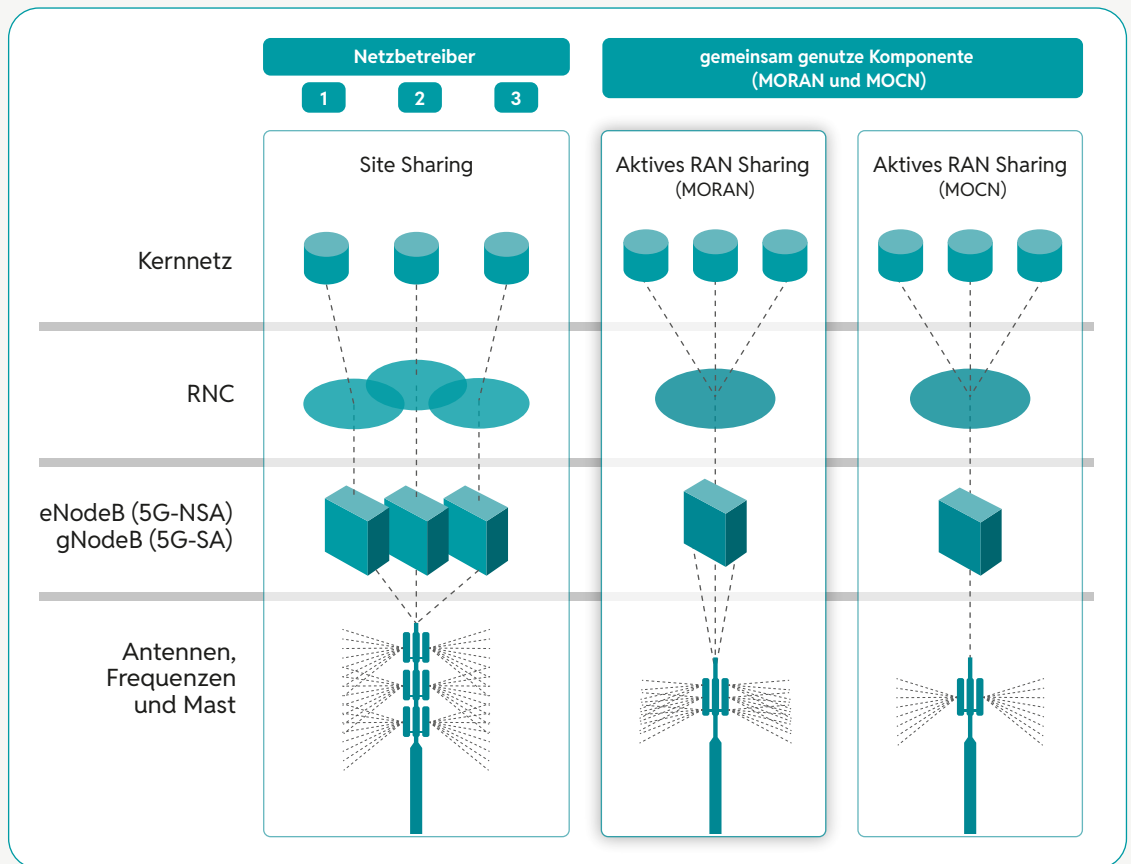
In der Regel nutzen Netzbetreiber ihre eigene RAN-Technik an den Mobilfunkstandorten. Um die Investitions- und Betriebskosten zu senken, wird beim Ausbau entlang der Hochgeschwindigkeitstrassen die aktive Technik nur einmal ausgebaut und gemeinsam genutzt. Möglich wird das durch sogenanntes RAN-Sharing (MORAN). Damit teilen sich die Netzbetreiber die aktive Technik bis zum Übergabepunkt an das eigene Kernnetz. Jeder Netzbetreiber hat sein eigenes Kernnetz und nutzt die eigenen Frequenzen, wie in Abbildung 4 dargestellt. Um die Zahl der Handover zu reduzieren, werden mehrere Standorte zu einer Cell-ID zusammengefasst.

Das Mobilfunknetz ist zunächst als 5G-NSA (Non-Standalone) Netz geplant, wobei die Wahl der Mobilfunktechnik im Entscheidungsbereich der Netzbetreiber liegt. Damit ist ein

Abbildung 4:

Darstellung verschiedener Active-Sharing-Modelle. Für die Mobilfunkversorgung entlang der Hochgeschwindigkeitsstrecken in Spanien wird das MORAN-Konzept (mittlere Darstellung) genutzt. Jeder Netzbetreiber kann sein eigenes Frequenzspektrum nutzen. Frequenzpooling ist nicht vorgesehen.

Quelle: Eigene Darstellung



späterer Betrieb in der 5G-Standalone-Variante für einzelne Mobilfunknetzbetreiber nicht ausgeschlossen. Das 800 MHz-Band dient als 4G-Ankerband für die Signalisierung. In den beiden Frequenzbändern 700 MHz und 800 MHz haben alle drei in Spanien tätigen Netzbetreiber – Orange, Vodafone und Telefónica – die gleiche Menge an Spektrum. In jedem der beiden Bänder hat jeder Netzbetreiber 10 MHz im Down- und Upload (Frequenzduplex, FDD). Im Falle, dass alle drei Netzbetreiber das Netz nutzen, stehen insgesamt also 60 MHz Bandbreite jeweils für den Down- und Uplink zur Verfügung. Adif geht von einer Mindest-Download-Rate von 55 Mbit/s und einer Mindest-Upload-Rate von 40 Mbit/s pro Band und Netzbetreiber aus. Das entspricht einer Datenrate von 110 Mbit/s pro Netzbetreiber im Downlink. Im optimalen Fall – wenn die Infrastruktur von allen drei Netzbetreibern genutzt wird – steht dementsprechend eine Gesamtdatenrate von 330 Mbit/s zur Verfügung. Da kein Frequenzpooling vorgesehen ist, bleibt jeder Netzbetreiber jedoch auf 110 Mbit/s limitiert.

Die Versorgung der Fahrgäste erfolgt direkt zu den Endgeräten. Es werden keine Repeater oder Verstärker in den Zügen verbaut. Es ist somit von Seiten der Adif auch keine über eine Mobilfunkzuführung herbeigeführte WLAN-Versorgung in den Zügen über Außenantenne angedacht. Damit die Versorgung im Zug trotz der dämpfenden Eigenschaften der Zughülle gewährleistet ist, wird ein minimaler Leistungspegel (RSRP) von -82 dBm für den Außenbereich festgesetzt, der nicht unterschritten werden darf. Maximal 5 % des Versorgungsbereichs am Zellrand darf den minimalen Leistungspegel vorweisen. Die Dämpfung des Zuges wird mit -23 dBm angenommen, sodass in den Zugabteilen ein RSRP-Wert von -105 dBm nicht unterschritten werden sollte, wie Abbildung 5 zeigt. Entsprechend dieser Vorgaben wird die Funknetzplanung realisiert und die Höhe sowie Abstände zwischen den Standorten festgelegt.

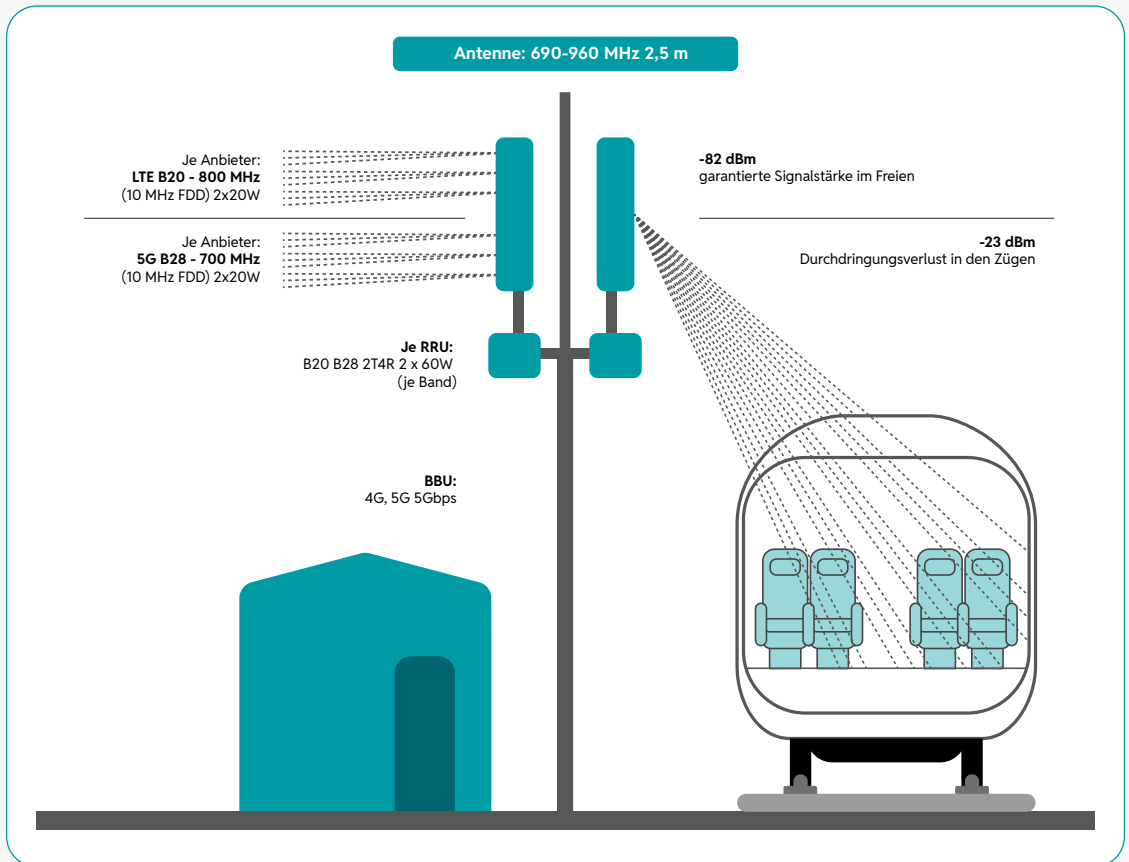
Der Austausch oder das Lasern der metallbeschichteten Fensterscheiben der spanischen Züge ist nicht Bestandteil des Projekts und liegt auch nicht im Verantwortungsbereich von Adif.

Abbildung 5:

Funknetzaufbau, verwendete Frequenzen und Dämpfungswerte für die direkte Versorgung der Reisenden im Zug. Die geringe Signaldämpfung im Außenbereich des Zuges stellt sicher, dass auch im Zuginneren – trotz der hohen Dämpfung – eine ausreichende Versorgungsqualität gewährleistet ist.

Quelle:

Ausschreibungsunterlagen von Adif.
Eigene Darstellung



Die Umsetzung obliegt den jeweiligen Zugbetreibern. Dennoch gibt es unabhängig davon auch Aktivitäten in diese Richtung. Die Planung der Signalpegel geht von undurchlässigen Fensterscheiben aus. Beim Einsatz von Zügen mit gelaserten Scheiben ist zu erwarten, dass sich dort die Versorgungsqualität noch einmal deutlich verbessert.

Technische Ausrüstung der Mobilfunkstandorte

Jede BBU versorgt bis zu fünf Standorte bzw. zehn RRHs. Die Anzahl der Standorte pro BBU hängt wesentlich von der Topografie und der bestehenden Infrastruktur ab. Die Standorte werden von der BBU aus an das Glasfasernetz angeschlossen. Dabei kommt eine Ringstruktur zum Einsatz. Jeder Standort wird mit zwei RRHs und zwei Antennen ausgestattet. Die beiden Antennen versorgen jeweils einen Sektor in

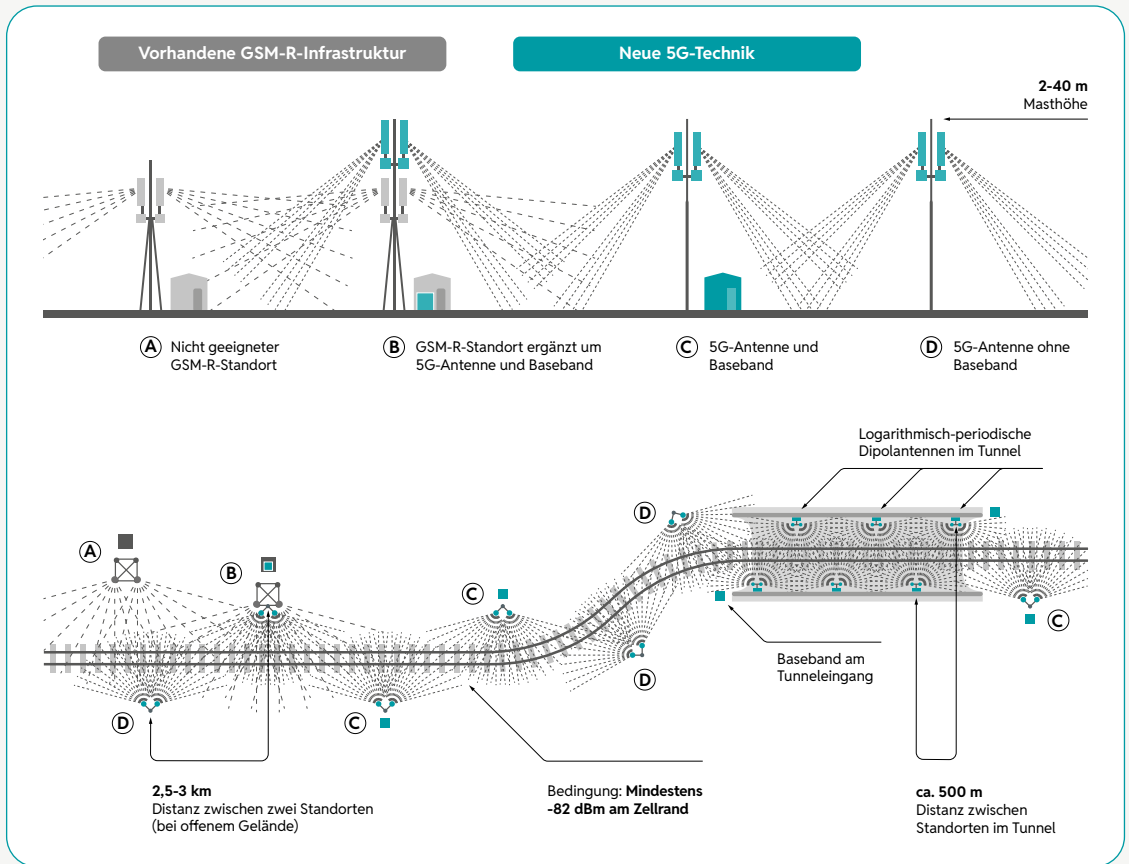
jede Fahrtrichtung (vgl. Abbildung 6). Für die BBS wird an den neuen Standorten ein Technischrank gebaut. An den bestehenden Standorten sind bereits Vorrichtungen vorhanden.

Eine besondere Herausforderung stellen die vielen Tunnel entlang der Hochgeschwindigkeitstrassen dar. Je nachdem, ob es sich um Tunnel mit einer oder mit zwei Röhren handelt, unterscheidet sich der technische Aufbau. In Tunneln mit einer Röhre werden zwei log-period-Antennen mit einer Radiounit verbaut. Sind zwei separate Tunnelröhren vorhanden – also für jede Fahrtrichtung eine –, dann werden insgesamt vier log-period-Antennen verbaut: je zwei pro Richtung, jeweils mit zwei Radiounits. Die BBU wird immer am Tunneleingang positioniert. Die Abstände der Radiounits betragen in den Tunneln ca. 500 m. Bei sehr kurzen Tunnelstrecken werden die Antennen und RRHs jeweils nur an den Tunneleingängen installiert.

Abbildung 6:

Funknetzaufbau, verwendete Frequenzen und Dämpfungswerte für die direkte Versorgung der Reisenden im Zug. Die geringe Signaldämpfung im Außenbereich des Zuges stellt sicher, dass auch im Zuginneren – trotz der hohen Dämpfung – eine ausreichende Versorgungsqualität gewährleistet ist.

Quelle: Ausschreibungsunterlagen von Adif.
Eigene Darstellung



2.1.3 Wirtschaftliche Umsetzung und Genehmigungen

Nach der Fertigstellung geht die gesamte Infrastruktur in den Besitz von Adif über. Adif ist damit eine Art Tower Company, die auch die RAN-Infrastruktur betreibt und somit als Neutral-Host auftritt. Die Netzbetreiber stellen lediglich die Frequenzen sowie ihre bestehende Core-Infrastruktur bereit. Die drei ausgeschriebenen Lose umfassen auch die Wartung und den Betrieb der aufgebauten Infrastruktur für drei Jahre durch den jeweiligen Netzbetreiber. Im Anschluss wird Adif die Leistung neu ausschreiben und plant dies an nur einen Auftragnehmer zu vergeben.

Um die Kosten für den Ausbau zu senken, soll möglichst viel bestehende Infrastruktur genutzt werden. Das sind insbesondere die bestehenden Glasfasertrassen und die GSM-R-Sendemasten sowie dazugehörige Einrichtungen.

Die Bieter mussten mit dem Gebot die Zusage von mindestens einem Mobilfunknetzbetreiber

(Inhaber von Frequenzspektrum im 700 und 800 MHz-Bereich) vorlegen, die Strecke vollständig mit Mobilfunk zu versorgen. Die Nutzung der Infrastruktur steht allen Netzbetreibern offen. Laut Ausschreibungsunterlagen wird für die Nutzung eine jährliche Gebühr erhoben, die sich je nach Los unterscheidet (vgl. Tabelle 2).

Mit Stand Mitte Februar 2025 wurden die in Tabelle 3 angeführten Preise mit den Netzbetreibern noch verhandelt. Hintergrund war, dass Telefónica keines der Lose gewonnen hatte und sich damit nicht unmittelbar am Ausbau beteiligen konnte. Dadurch war Telefónica auch nicht an die Kosten gebunden, die den Ausschreibungen zugrunde lagen, und konnte die Konditionen mit Adif frei verhandeln. Die mit Telefónica verhandelten Preise sollten jedoch auch für die übrigen Netzbetreiber gelten. Damals stand ein Nachlass von 20 Prozent auf die Ausschreibungspreise im Raum. Aufgrund der zu diesem Zeitpunkt laufenden Verhandlungen war noch nicht abschließend geklärt, welche Netzbetreiber die jeweiligen Strecken versorgen würden. Fest stand

Tabelle 2: Kosten für die Nutzung des Mobilfunknetzes an den Bahnstrecken.

Los	Abschnitt	Maximalpreis pro Netzbetreiber (ohne MwSt.)
1	Plasencia-Cáceres-Badajoz Antequera – Granada	528.484 €/ Jahr
2	Olmedo – Ourense	599.646 €/ Jahr
3	Albacete – Alicante Barcelona – Figueras	534.776 €/ Jahr

lediglich der Netzbetreiber, der das jeweilige Los gewonnen hatte. Zum aktuellen Stand der Verhandlungen liegen keine belastbaren Informationen vor.

Die Standorte werden auf den Liegenschaften von Adif errichtet. Dadurch sind laut Aussage der Interviewpartner zunächst keine Baugenehmigungen erforderlich. Es erfolgten im Vorlauf lediglich vorbereitende Standortanalysen. In einigen Fällen können dort Genehmigungen notwendig werden, wo archäologisch relevante Gebiete betroffen sind oder Umweltinteressen eine Rolle spielen. Auch sind Genehmigungen in Hinblick auf die Flugsicherheit in einigen Fällen relevant.

Dort, wo Genehmigungen notwendig sind (z. B. in Gewässernähe), betreffen sie ein größeres Gebiet, in dem mehrere Standorte geplant sind. Es ist also keine Baugenehmigung für Einzelstandorte notwendig. Kompensationszahlungen für Eingriffe in die Umwelt sind in Spanien nach Kenntnis der Befragten nicht üblich und nicht zu erwarten.

2.1.4 Erkenntnisse und Handlungsempfehlungen

Die Ausbauvorhaben in Spanien sind nicht in allen Ausprägungen unmittelbar vergleichbar mit den geplanten Zielvorgaben in Deutschland. Während in Spanien z. B. ausschließlich Low-Band-Frequenzen zum Einsatz kommen, zielen die Bestrebungen in Deutschlands darauf ab, auch Midband-Frequenzen und perspektivisch auch Highband-Frequenzen einzusetzen, um auf diese Weise eine leistungsstarke Mobilfunkverbindung für Bahnreisende im Gigabitbereich zu erreichen. Trotz der Unterschiede lassen sich aus der spanischen Vorgehensweise Erkenntnisse

gewinnen und Handlungsempfehlungen ableiten, die entweder bisherige Überlegungen und Planungen unterstützen oder Impulse und Ideen für den Ausbau der Strecke von Berlin nach Hamburg liefern.

In Spanien wird der Aufbau der Infrastrukturen durch die spanische Bahngesellschaft orchestriert. Da die Errichtung der Mobilfunkmasten im Wesentlichen auf dem Hoheitsgebiet der Bahn stattfindet, ist es nachvollziehbar und gewissermaßen folgerichtig, dass die Bahn den Aufbau koordiniert. Aus diesem Grund ist es auch plausibel, dass das Projekt Berlin-Hamburg maßgeblich von der Deutschen Bahn geleitet wird und in ihrem Verantwortungsbereich liegt.

Bereits im Rahmen der ersten Studie hat sich herausgestellt, dass für den Aufbau von Korridoren entlang von Bahntrassen die Finanzierung von entscheidender Bedeutung ist. Häufig scheitern entsprechende Bauvorhaben, weil sie schlicht zu teuer sind. Gleiches gilt für Spanien. Ohne die finanzielle Unterstützung durch Mittel aus der Europäischen Recovery and Resilience Facility hätte der Ausbau nach Aussagen von Projektbeteiligten nicht realisiert werden können.

Durch die EU-Förderung können in Spanien die hohen Investitionskosten für das lineare Mobilfunknetz an den Hochgeschwindigkeitstrassen finanziert werden. Auch der hohe Anteil nutzbarer Infrastruktur – hier insbesondere das vorhandene Glasfasernetz – reduziert die Investitionskosten maßgeblich. Es fallen somit nur Kosten für die laufenden Wartungen und den Betrieb an. Diese Betriebskosten werden von Adif über die jährlichen Gebühren auf die Netzbetreiber umgelegt.

Der Zeitraum für die Einholung aller Genehmigungen beträgt laut Adif zwischen drei und sechs Monaten.

Im Vergleich zur Teststrecke Berlin-Hamburg sind die Investitionskosten in Spanien aller Wahrscheinlichkeit nach deutlich geringer. Das liegt zum einen daran, dass die Abstände der Sendemasten wesentlich größer sind und somit weniger Standorte neu gebaut werden müssen, und zum anderen daran, dass vorhandene passive Infrastruktur mitgenutzt werden kann.

Wichtig ist, derartige Ausbauvorhaben als Gemeinschaftsaufgabe zu verstehen. In Spanien wurde der Weg der Ausschreibung gewählt, bei dem theoretisch alle drei Netzbetreiber ein Los

hätten gewinnen können. Tatsächlich haben nur zwei Netzbetreiber einen Zuschlag bekommen. Die erforderlichen Preisverhandlungen mit Telefónica haben auch direkte Auswirkung auf die anderen Netzbetreiber, da die Konditionen für alle gleich sein müssen (Förderungsvorgaben). Dadurch ergeben sich neue Herausforderungen und Verzögerungen im Projekt. Es zeigt sich, dass ein Kooperationsmodell, in dem alle Netzbetreiber von Anfang an gleichermaßen in das Projekt integriert sind, wesentliche Vorteile bietet und nachträgliche Verhandlungen und Verzögerungen verhindern kann.

2.2 Schweiz

Eine Besonderheit der Versorgung der Bahnreisenden in der Schweiz liegt darin, dass die Züge direkt mit Mobilfunk versorgt werden – also nicht mittels WLAN oder WiFi. Auf vielen Strecken surfen die Bahnreisenden dabei kostenlos in den Schweizer Mobilfunknetzen. Durch Registrierung in einer kostenlosen App und Aktivierung des Bluetooth erkennt der Mobilfunknetzbetreiber, dass sich die Kund:innen im Zug befinden, und die entstehenden Surfkosten werden von der Schweizerischen Bundesbahn (SBB) übernommen.¹³

Für die Schweiz ist die Versorgung mit leistungsfähigem Mobilfunk entlang der Zugstrecken angesichts des steigenden Datenvolumens weiterhin ein wichtiges Anliegen, aber auch eine immense Herausforderung. Eine mögliche Lösung wird in einem eigens konzipierten Antennenkorridor entlang der Bahntrassen gesehen. Erste Tests mit Gigabitgeschwindigkeit in fahrenden Zügen wurden in der Schweiz bereits im Jahr 2020 durchgeführt. Am Walensee konnte die Swisscom auf einer Teststrecke mit einem neu konzipierten Antennenkorridor Gigabitgeschwindigkeit in einem fahrenden Zug realisieren. In einem schrittweisen Vorgehen wurden zahlreiche Kombinationen (Mobilfunkgenerationen 4G und 5G, Sitzposition, Zugwagentyp, Sendeleistungen, Zugfenster, Mast-Antennen, Smartphone-Modelle,

Frequenzbänder usw.) in über 200 Zugfahrten gemessen und analysiert. Das Projekt hat gezeigt, dass durch die Kombination von 4G und 5G in einem Antennenkorridor Downloadgeschwindigkeiten von über 1,2 Gbit/s im fahrenden Zug erzielt werden konnten. Die Reaktionszeit von 5G war viermal kürzer als bei 4G und lag bei 8 Millisekunden.¹⁴ Für die 5G-Technologie wurden Frequenzen im 3,5 GHz-Bereich genutzt. Durch die Nähe der Antennen zu den Gleisen und damit zu den Endgeräten konnte als positiver Nebeneffekt die Sendeleistung der Antennen zudem reduziert und die Versorgung entlang des Bahnkorridors zielgerichteter erfolgen.¹⁵

Bis Mitte der 2030er Jahre soll der Bahnfunk modernisiert und fit für eine nachhaltige und effiziente Bahn der Zukunft gemacht werden. Konkret soll die bisherige 2G-basierte Bahnfunk-Technologie durch den neuen europäischen 5G-Standard FRMCS ersetzt werden. Im Zuge dieser Modernisierung planen die Schweizerischen Bundesbahnen (SBB) und die Mobilfunkanbieter zwischen Bern und Thun eine sinnvolle Zusammenarbeit, um auch den Mobilfunk für die Bahnreisenden zu verbessern. Die gewonnenen Erkenntnisse könnten dann als Blaupause künftig in der gesamten Schweiz genutzt werden. Dafür wollen die SBB und die Mobilfunkanbieter vorhandene Synergien

13 Schweizerische Bundesbahnen, Gratis surfen mit «SBB FreeSurf», <https://www.sbb.ch/de/bahnhof-services/waehrend-der-reise/service-im-zug/freesurf.html>, zuletzt abgerufen am 13.04.2026

14 Schädeli A., Zukünftig mehr Bandbreite im Zug, Swisscom, <https://www.swisscom.ch/de/about/news/2020/10/21-mehr-bandbreite-im-zug.html>, zuletzt abgerufen am 13.04.2026.

15 IT Magazine, Swisscom erreicht 1,2 Gbit/s im Zug, https://www.itmagazine.ch/artikel/73249/Swisscom_erreicht_12_Gbits_im_Zug.html, zuletzt abgerufen am 13.04.2026

nutzen und die bestmöglichen gemeinsamen Standorte für den notwendigen Bau neuer Antennen auswählen (Koordinationspflicht). Der synergetische Ansatz baut auf bereits bestehenden Kooperationen zwischen der SBB und den Mobilfunkunternehmen auf. Mobilfunknetzbetreiber nutzen bereits heute in Teilen die Basisinfrastruktur der SBB, darunter Masten, Glasfasertrassen, Stromversorgung, Tunnelfunkanlagen sowie Grund- und Bodenflächen der Eisenbahn. Auf Grundlage dieser etablierten Kooperationen kann der weitere Roll-out koordiniert, effizient und zielgerichtet erfolgen.

Um den künftigen Bahnfunk bereitstellen zu können, soll ein Teil der bestehenden Antennenstandorte umgebaut werden. Zudem ist der Bau zusätzlicher Standorte geplant, da die Reichweite von FRMCS aufgrund einer höheren Frequenz von 1,9 GHz geringer ist. Die Antennen versorgen gezielt den Bahnkorridor und nicht – wie bei herkömmlichen, kommerziellen Mobilfunkantennen – die gesamte Umgebung.¹⁶ Auf der 31 km langen Strecke sollen 43 Antennenstandorte errichtet werden, die dann einerseits für den neuen Bahnfunk genutzt werden und andererseits der Fahrgastversorgung mit 5G dienen.¹⁷ Dabei wird ein Sharing der Basisinfrastruktur angestrebt, in welchem sowohl die schweizerische Eisenbahn als auch die Mobilfunknetzbetreiber ihre Zuständigkeiten jeweils auf den FRMCS- bzw. 5G-Betrieb fokussieren. Das auf der Strecke Bern-Thun errichtete Testfeld läuft daher unter dem Oberbegriff KBK (koordinierte Bahnkorridorversorgung).

Die grundsätzliche Systeminfrastruktur, die u. a. die Antennen sowie den Netz-Core beinhalten, ist für den FRMCS-Betrieb durch die SBB und die 5G-Versorgung durch die Mobilfunkunternehmen jeweils getrennt zu verantworten. Die Zusammenarbeit stützt sich vornehmlich auf eine verdichtete Standortinfrastruktur entlang der Bahntrasse. Für den FRMCS-Betrieb im 1,9 GHz-Band sind jeweils bestehende GSM-R-Standorte durch die Bahn auf FRMCS umzurüsten sowie weitere Masten neu zu errichten, um ein flächendeckendes Funknetz entlang der

Strecke sicherstellen zu können. Infolgedessen sollen Standorte für den FRMCS-Dienst rund alle 1 bis 2 km entlang der Strecke verfügbar sein. Sowohl die Bestands- als auch Neubaustandorte können durch die Mobilfunknetzbetreiber mitgenutzt werden. Da die 5G-Mobilfunkversorgung jedoch in einem höheren Frequenzbereich (3,5 GHz) erfolgt, müssen für eine lückenlose Mobilfunkversorgung zusätzlich Standorte entlang der Bahnstrecke errichtet werden, die sich in einem Abstand von ca. 500 m bis 1 km voneinander entfernt befinden. Für die Errichtung der zusätzlichen Standorte sind alleinig die Mobilfunkunternehmen verantwortlich, können aber für den Bau der Standorte auf den Bahngrund zurückgreifen. Daraus ergibt sich ein Versorgungskorridor aus Standorten, die abwechselnd sowohl von der Bahn und den Netzbetreibern gemeinsam und durch die Mobilfunkunternehmen allein genutzt werden.

Begründet wird das gewählte Vorgehen damit, dass ein alleiniges Mitnutzungsszenario der FRMCS-Standorte mit Mobilfunk keine ausreichende Abdeckung im angestrebten 3,5 GHz-Band bieten kann, um durchgehend Gigabitgeschwindigkeiten zuverlässig bereitzustellen. Andererseits wäre ein dediziertes Mobilfunknetz entlang der Strecke für die Mobilfunknetzbetreiber in den benötigten Abständen von unter 1 km Abstand wirtschaftlich nicht realisierbar gewesen, sodass in der Folge die gewählte Kooperationsweise als volks- und betriebswirtschaftlich sinnvollste Variante für beide Parteien erachtet wird. In der Umsetzung ergeben sich entlang des KBK 22 Standorte, die sowohl für FRMCS als auch Mobilfunkdienste in Nutzung gestellt werden. 21 Standorte entlang der Strecke werden ausschließlich von den Mobilfunkunternehmen genutzt. Daraus ergeben sich für die FRMCS-Versorgung ein durchschnittlicher Abstand von ca. 1,4 km zwischen den Standorten und rund 720 m für die Versorgung mit Mobilfunksignalen im 3,5 GHz-Band. Eine genaue Übersicht der Kennzahlen des KBK gibt Tabelle 3.

16 Schweizerische Bundesbahnen, Bahnfunk, <https://company.sbb.ch/de/bahnentwicklung/bahnbetrieb/telecom/bahnfunk.html>, zuletzt abgerufen am 13.04.2026.

17 Blick, 1800 neue 5G-Antennen für die Bahn, <https://www.blick.ch/wirtschaft/neue-art-von-sbb-wellen-1800-neue-5g-antennen-nur-fuer-die-bahn-id18331686.html>, zuletzt abgerufen am 13.04.2026.

Tabelle 3:
Kennzahlen
zum KBK¹

Bern – Thun (ca. 31 km)	Bahnkommunikation	Fahrgastkommunikation
Frequenz	1.900 MHz	3.400 – 3.600 MHz
Spektrum	10 MHz	120 / 100 / 80 MHz
Anzahl Standorte	22 (22 FRMCS)	43 (21 MNB / 22 Mitnutzung)
Durchschnittl. Intersite Distanz	ca. 1.400 m	ca. 720 m
Durchsatz	DL: ca. 3 Mbit/s / UL: ca. 3 Mbit/s	DL: ca. 1.350 Mbit/s UL: n.a.

2.3 Japan

Der japanische Mobilfunknetzbetreiber NTT DoCoMo testet schon seit einigen Jahren 5G in Hochgeschwindigkeitszügen. In Zusammenarbeit mit der Bahngesellschaft EAST Japan Railway (JR East) hat NTT DoCoMo erfolgreich ein 5G-Mobilfunksignal an einen Shinkansen-Testzug übertragen, der mit 360 km/h gefahren ist. Die Tests fanden im 4,85 GHz-Frequenzband statt, das eine Datenrate von bis zu 500 Mbit/s beim Empfang und 100 Mbit/s beim Senden erreicht. Zwei Basisstationen wurden in einem Abstand von ca. 900 m auf der Strecke installiert. Im Zug wurde eine Übergabestation eingesetzt, die den 3GPP-Standards entspricht. Das Gerät ist mit einer speziellen Beamforming-Funktion ausgestattet, die den Bereich der Funkwellenabstrahlung auf eine bestimmte Richtung konzentriert, einer Beamtracking-Funktion, die die Richtung der Funkwellenabstrahlung steuert, und Doppler-Kompensationsfunktionen, die Frequenzverschiebungen aufgrund des Dopplereffekts ausgleichen. Außerdem wurde eine spezielle Handover-Funktion entwickelt, um zwischen den Basisstationen zu wechseln, ohne dass die 5G-Mobilfunkkommunikation unterbrochen wird.¹⁹

In einem anderen Test hat NTT DoCoMo 5G-Mobilfunkkommunikation im 28 GHz-Band zwischen Basisstationen und einem Hochgeschwindigkeitszug realisiert. Ultrahochgeschwindigkeitsdaten und hochauflösende Videos wurden erfolgreich zwischen einem in einem Shinkansen-Triebwagen installierten 5G-Versuchsmobilterminal und entlang der Tokaido-Shinkansen-Gleise installierten 5G-Basisstationen übertragen. Der Zug fuhr mit einer Geschwindigkeit von 283 km/h. Bei den Versuchen wurden erfolgreiche 5G-Datenübertragungen mit Geschwindigkeiten von mehr als einem Gbit/s und ein fortlaufendes Handover zwischen drei Basisstationen entlang der Strecke nachgewiesen. Die Übertragungen wurden durch fortschrittliche Beamforming- und Beamtracking-Technologien erleichtert.²⁰

In Japan wurden somit schon erfolgreiche Tests in beiden Frequenzbereichen (3GPP FR1 und FR2, vgl. Kapitel 4) durchgeführt und zentrale Herausforderungen wie Handover und Dopplereffekt erfolgreich technisch gelöst.

¹⁸ Brand, A.; Rohrbach F. (2024, 8. März), Wie die SBB den Bahnfunk für die Zukunft fit macht, https://asut.ch/asut/media/id/3106/type/document/20240308_praes_brand_rohrbach_sbb_ohne_Seite_5_13_ok.pdf, zuletzt abgerufen am 18.05.2026.

¹⁹ International Railway Journal, JR East successfully tests 5G communications at 360 km/h, <https://www.railjournal.com/telecoms/jr-east-successfully-tests-5g-communications-at-360km-h/>, zuletzt abgerufen am 13.04.2026.

²⁰ Juan Pedro Tomás, DoCoMo achieves 5G communication between bullet train and BTSs, RCR Wireless News, <https://www.rcrwireless.com/20191001/5g/docomo-achieves-5g-communication-between-bullet-train-bts>, zuletzt abgerufen am 13.04.2026.

2.4 China

Chinesische Schnellfahrstrecken sind heute bereits weiträumig mit einer performanten 5G-Versorgung ausgestattet. Seit dem Jahr 2020 wurden bereits über 35.000 km Schienenstrecke – das entspricht 65 % Gesamtabdeckung aller Bahntrassen – mit 5G-Technologie versorgt. Der durchschnittliche Abstand der Sendestandorte entlang aller mit 5G versorgten Bahntrassen liegt bei rund 510 m. Genutzt wird dabei zumeist eine Dual Layer Frequenzversorgung im 700 MHz- und 2,6 GHz-Band auf den Basisstrecken sowie in den 1,8 und 2,1 GHz-Bändern auf den besonders nachgefragten Streckenabschnitten. Exemplarisch soll an dieser Stelle die in diesem Jahr eröffnete Hochgeschwindigkeitsstrecke von Guiyang nach Nanning hervorgehoben werden, die einem neuen Versorgungskonzept folgt:²¹ Wurden Hochgeschwindigkeitstrassen bisher mit rund 350 Mbit/s über 5G-Mobilfunk versorgt, stehen auf dieser Strecke nun durchschnittlich 750 Mbit/s Bandbreite zur Verfügung, die auf bis zu 1,1 Gbit/s in der Spitze skaliert werden kann. Der Upload fällt hingegen deutlich geringer aus und liegt bei knapp 100 Mbit/s. Zur Versorgung der Strecke wurde ein auf die Ansprüche der Zugversorgung zugeschnittenes dediziertes 5G-Netz entlang der 350 km langen Neubaustrecke errichtet. Dabei kommt ein Single-Frequency-Netz zum Einsatz, welches vom Betreiber als Co-Cell-Konzept beschrieben wird. Insgesamt wurden nach Angaben der Betreiber mehr als 652 Basisstationen entlang der Strecke errichtet.

Die gut ausgebaute Mobilfunkversorgung entlang der Hochgeschwindigkeitstrassen soll primär einen Mehrwert für die Pendler schaffen. Dazu werden von den Mobilfunknetzbetreibern spezielle Datenpakete für eine priorisierte Nutzung²² der dedizierten 5G-Infrastruktur angeboten, die nicht nur eine höhere Datenübertragungsrate gegenüber Standardverträgen beinhalten, sondern auch bevorzugte Dienstklassen (Slices) bereitstellen – insbesondere für Videoübertragung und niedrige Latenzen. Ohne das Upselling solcher priorisierter Datenpakete würde sich nach Angaben der chinesischen Mobilfunknetzbetreiber der Ausbau an den Strecken nicht rentieren. Im Fokus der Vermarktung stehen dabei vor allem Geschäftsreisende und Berufspendler im Alter zwischen 20 und 50 Jahren, die besonders technikaffin sind und auch zugleich über ein hohes Einkommen verfügen, das rund 35 bis 50 % über dem Durchschnittseinkommen in China liegt.

Zusätzlich zu dem Ausbau der öffentlichen Mobilfunkinfrastruktur findet auch in China die Ertüchtigung des Bahnfunks von GSM-R zum FRMCS-Dienst statt. Dabei wird in der Migrationsphase jedoch nicht primär der Fokus allein auf FRMCS gesetzt, sondern der moderne Zugfunk als ein Bestandteil vieler weiterer miteinander kombinierbarer Dienste verstanden.²³ So sollen u. a. Cloud-Dienstleistungen (Virtualisierung bahnbetrieblicher Anwendungen) sowie KI-basierte Streckenüberwachung mittels Video- und Sensing-Anwendungen gebündelt werden. Die Umsetzung erfolgt in einem gemeinsamen Paket im Rahmen einer digitalen Bahnbetriebsanwendung.

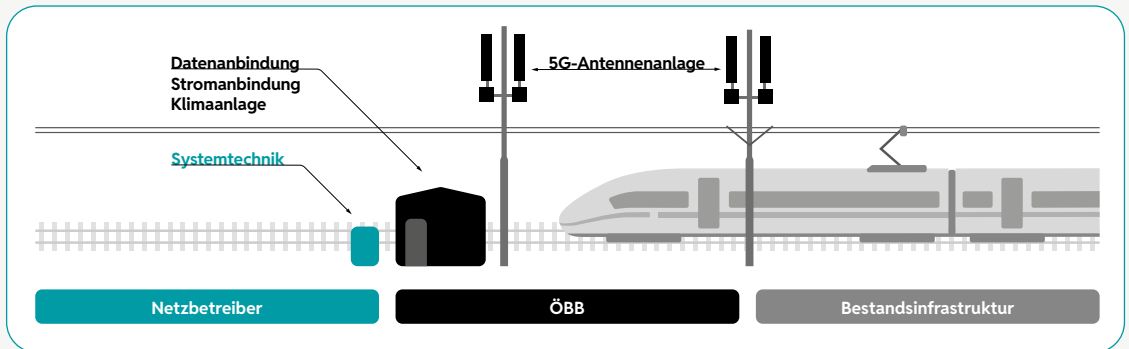
21 Guangxi Mobile 5G private network covers the Guangxi section, (unveröffentlicht).

22 Huawei (2025, 18. Juni), Giga-Rail Project Strategy & Solution Discussion, (unveröffentlicht).

23 Ji, A. (2025, März). Huawei's sharing of „Go Broadband“ in Rail, (unveröffentlicht).

Abbildung 7:
Grundsätzlicher
Standortaufbau im
Rahmen des Projek-
tes PROGMO.

Quelle: Eigene
Darstellung



2.5 Österreich

Die Verbesserung der Versorgung der Bahnstrecken wurde in Österreich bereits 2015 ins Visier genommen. Sie erfolgt seitdem im Rahmen des bereits abgeschlossenen Projekt Mobilfunk PROGMO und dem in Umsetzung befindlichen Folgeprojekt PROGMO+.

Ziel des Projektes PROGMO war es, eine durchgehende Mobilfunkversorgung entlang 38 priorisierter Strecken (auf denen 98 Prozent der Bahnkunden verkehren) in Kooperation mit allen drei Mobilfunknetzbetreibern herzustellen. Die Gesamtprojektleitung lag bei der ÖBB-Infra, einer 100-prozentigen Tochtergesellschaft der Österreichischen Bundesbahnen Holding AG (ÖBB). Zum Einsatz kamen die Frequenzbänder 800 MHz, 900 MHz, 1.800 MHz, 2.100 MHz sowie 2.600 MHz. Die ÖBB war für die Errichtung der Standortinfrastruktur verantwortlich und stellte auch die Breitbandanbindung mittels Glasfaserkabel zur Verfügung. Die Mobilfunkbetreiber nutzen gemeinsam die errichtete Infrastruktur und rüsten ihrerseits die Funkstationen mit Systemtechnik aus. Bei der Standortwahl lag das Augenmerk auf der Mitnutzung und Wiederverwendung von vorhandenen Einrichtungen (Fahrleitungsmasten, Bestandsfunkeinrichtungen, Lichtwellenleiter, Übertragungstechnik). Der bisherige Ausbau beinhaltete die Technologien 2G, 3G und 4G.²⁴ Die bestehenden Netze werden laufend optimiert, um den Bahnkund:innen die bestmögliche Performance zu bieten und die Verfügbarkeit für den Bahnbetrieb nach höchsten Maßstäben sicherzustellen. Dazu

werden die ausgebauten Strecken regelmäßig gemessen und – wo notwendig – entsprechend optimiert.

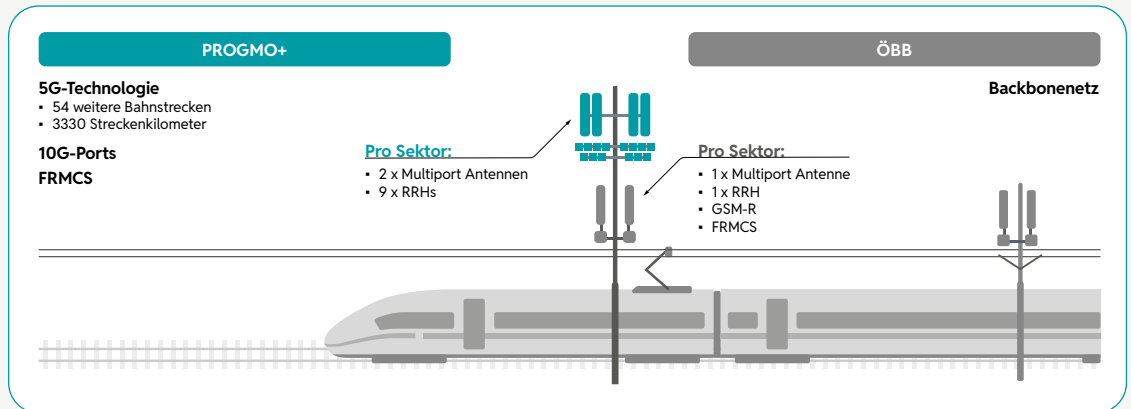
Derzeit legt die ÖBB-Infrastruktur AG im Rahmen von PROGMO+²⁵ die Grundlagen für den weiteren Mobilfunkausbau. Dazu zählen die Verbesserung der Mobilfunkversorgung entlang zusätzlicher Strecken sowie die Erweiterung bestehender Ausbauten mit 5G. Konkret sollen 54 weitere Bahnstrecken ertüchtigt werden, die im Rahmen von PROGMO keine Berücksichtigung fanden. Zudem ist vorgesehen die Bestandsstrecken mit 5G-Technologie nachzurüsten, sodass bis zum Jahr 2032 rund 3.330 Streckenkilometer in Österreich mit einer leistungsfähigen Mobilfunkinfrastruktur versorgt sein werden. Weitere Maßnahmenpakete beinhalten neben der 5G-Ertüchtigung eine Technologieerweiterung der Standortkonzepte um 10G-Ports, eine ausschließlich auf die Bahntrassen fokussierte Ausrichtung der neuen Antennenanlagen und die erstmalige Berücksichtigung von FRMCS im Rahmen von PROGMO. Dabei ist weiterhin das Ziel, wann immer es möglich ist, bestehende Infrastrukturen sowohl im Erstausbau als auch im Rahmen der Ertüchtigung zu nutzen. Zudem errichtet die ÖBB in einem separaten aber zeitlich parallel zu PROGMO+ verlaufenden Vorhaben ein neues Backbone-Netz, welches zukünftig als Zuführung für das FRMCS-Netz dienen soll. Eine Übersicht der technischen Änderungen am Standortkonzept bietet Abbildung 8.

²⁴ Trend Mobility Magazin April 2021, C-ITS – Cooperative Intelligent Transport Systems, https://www.attc.at/wp-content/uploads/2021/05/210414_ATT_C_Schriftenreihe2020_Ansicht_Doppelseite.pdf, S. 34f, zuletzt abgerufen am 14.04.2026.

²⁵ Veits, C. (2024, 6. März). PROGammMObilfunk, (unveröffentlicht).

Abbildung 8:
Änderungen am
Standortkonzept
im Rahmen von
PROGMO+

Quelle: Eigene
Darstellung.



Da in Zukunft weitere bahnspezifische Dienste über öffentliche 5G-Netze geführt werden sollen, führt die ÖBB-Infrastruktur AG in Kooperation mit dem österreichischen Mobilfunkbetreiber A1 einen Network-Slicing-Piloten durch.²⁶ Im Rahmen des Pilotprojekts soll entlang von Nebenstrecken erprobt werden, ob eine Verlagerung ausgewählter Bahndienste auf ein öffentliches Mobilfunknetz in einem dedizierten Network Slice betriebstechnisch sinnvoll umsetzbar ist.

Ein dediziertes Funknetz entlang der Bahnstrecken im Sinne eines Korridors oder die ausdrückliche Gigabitversorgung der Bahnreisenden lassen sich aus den öffentlich zugänglichen Quellen derzeit nicht ableiten. Vielmehr hat man sich zu Beginn des Projektes die technisch-wirtschaftlich beste Lösung zur

Streckenversorgung mit den Projektpartnern genau angesehen. Auf Basis von Messungen wurden die Schwachstellen der Betreibernetze analysiert und durch im Projekt errichtete Sendemasten bzw. Repeater-Anlagen verbessert. Ziel war und ist, eine möglichst durchgängige Mobilfunkversorgung zu gewährleisten, welche auch für volle Züge bei hohen Geschwindigkeiten (Railjets fahren mit ca. 230 km/h) bereitsteht. Ein Punkt war zudem die unterschiedliche Dämpfung in den Waggons je Zug. Hier konnten die ÖBB-PV mit Repeatern im Railjet Verbesserungen erzielen. Die Westbahn setzt ebenfalls Repeater ein. Zudem ist man bei der ÖBB der Auffassung, dass solche anspruchsvollen Infrastrukturprojekte nur gemeinsam – in Zusammenarbeit mit Behörden, Infrastrukturbetreibern und Mobilfunknetzbetreibern – bewerkstelligt werden können.

2.6 Exkurs: Öffentliche Mobilfunknetze als Träger für FRMCS-Dienste

Das Beispiel Österreich zeigt, dass neben Bestrebungen zu einer verbesserten Mobilfunkversorgung für die Passagiere auch die Nutzung öffentlicher Mobilfunknetze für bahnbetriebliche Dienste vermehrt in den Fokus rückt. Mit einer solch synergetischen Nutzung bereits bestehender Mobilfunkinfrastruktur sollen nicht nur Kostenvorteile beim FRMCS-Roll-out erzielt werden, sondern vielmehr steht auch der Gedanke eines redundanten Fallbacks

für zeitkritische und sicherheitsrelevante Bahnbetriebsdienste im Raum. Vor diesem Hintergrund wurden in Europa verschiedene Testfelder eingerichtet, welche sich mit der Erprobung von FRMCS befassen. Im Folgenden soll der Blick auf ausgewählte Vorhaben gelegt werden, die gezielt auch die Einbindung öffentlicher Mobilfunknetze für FRMCS-Anwendungen zum Gegenstand haben.

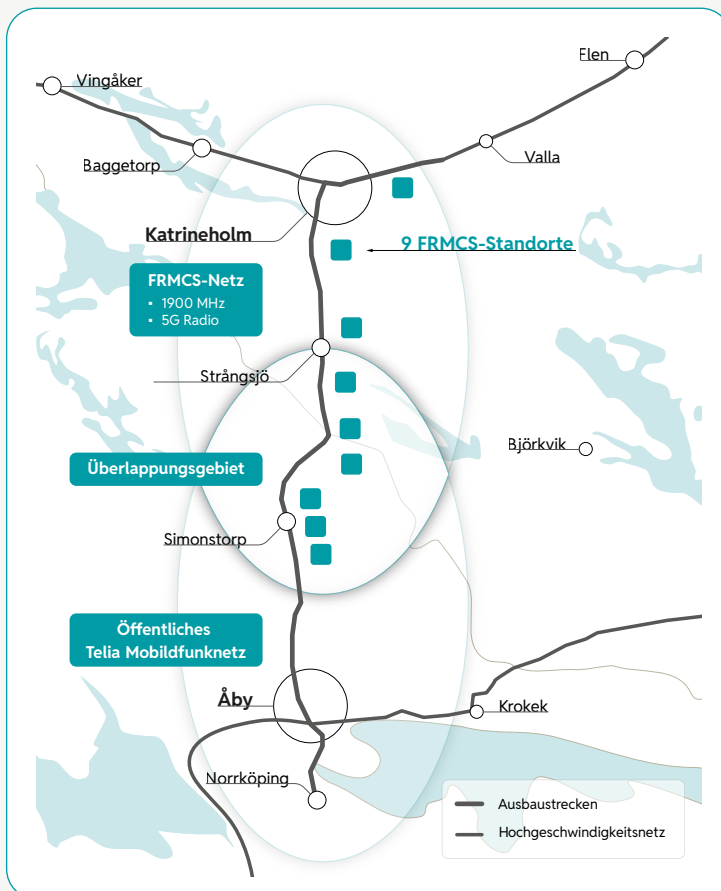
2.7 Schweden

Im Rahmen des mit Mitteln aus dem EU-Programm Horizon Europe geförderten Leuchtturmprojekts FP2-MORANE-2 forscht das schwedische Amt für Verkehrswesen Trafikverket (TRV) nach Möglichkeiten zur Integration öffentlicher Mobilfunknetze in das FRMCS-Konzept. Gegenstand des Testfelds an der rund 40 km langen Teststrecke zwischen Katrineholm und Åby ist es, den Systemübergang zwischen dem FRMCS-Netz auf 1.900 MHz und dem öffentlichen Telia-Mobilfunknetz im 700 MHz-Bereich zu erproben.²⁷ Im nördlichen Abschnitt der Strecke wurden dafür neun FRMCS-Standorte mit Masthöhen von 4 bis 54 m errichtet, welche ca. zwei Drittel der Gesamtstrecke mit ihrer Funkausleuchtung versorgen können. Bei den für den Feldversuch genutzten Telia-Standorten handelt es sich hingegen um Bestandsbauten.

Für den Test wurde ein Zug mit spezieller FRMCS-Hardware ausgerüstet, der mit einer Geschwindigkeit von bis zu 180 km/h auf der zweigleisigen Trasse den Wechsel zwischen FRMCS und öffentlichem Mobilfunknetz vice versa in beiden Fahrrichtungen vollziehen kann. Im Verlauf der Strecke startet der Zug von Norden kommend in Katrineholm im 1.900-MHz-FRMCS-Funknetz und wechselt anschließend in das 700-MHz-Netz von Telia. Dort wird der FRMCS-Dienst über eine MOCN-Lösung bis zur Endstation in Åby bereitgestellt. Beide Versorgungsbereiche überlappen sich im mittleren Teil des Streckenverlaufs, sodass auch das Verhalten der Endgeräte bei zwei parallel verfügbaren Frequenzbereichen mit FRMCS-Signalen nachvollzogen und optimiert werden kann.

Abbildung 9: Testkorridor zum Systemübergang zwischen FRMCS- und öffentlichem Mobilfunknetz entlang der Strecke Katrineholm – Åby.

Quelle: Eigene Darstellung.



²⁷ Vgl.: Trafikverket, Introducing FRMCS in Sweden, Präsentation, <https://bransch.trafikverket.se/contentassets/75c4f9bd651b448aa8a99bbbe88c9d21/introducing-frmcs-in-sweden-tr-fair-2025-trafikverket.pdf>, zuletzt abgerufen am 14.04.2026.

Parallel ist die Strecke Bestandteil des im Rahmen von CEF (Connected Europe Facility) Digital geförderten grenzübergreifenden Korridors 5G4RailScand. In dem Abschnitt zwischen Kopenhagen, Göteborg und Oslo erfolgt durch Bereitstellung der erforderlichen passiven digitalen Infrastruktur die erste grenzüberschreitende Implementierung von FRMCS im europäischen Verkehrskorridor Scan-Med.²⁸

In diesem Rahmen erfolgt ein weiteres, außerhalb des MORANE2-Testfeld liegendes

FRMCS-Forschungsvorhaben. Im Norralatunnel zwischen Söderhamn und Enångar, an der Bahnstrecke Stockholm–Sundsvall, wurde ein FRMCS-Testfeld mit Blick auf die Tunnelversorgung in Betrieb genommen. Die Tunnelanlage wurde mit Strahlungskabeln ausgestattet, welche die Funksignale von drei Makro-Funkstandorten im 3,8 km langen Tunnel verteilen. Mit diesem Testfeld wird die parallele Existenz von GSM-R, BOS, FRMCS auf 1.900 MHz und 4G/5G-Diensten von öffentlichen Mobilfunkbetreibern in einer Tunnelanlage erprobt.

2.8 Finnland

Im finnischen Digirail-Projekt²⁹ wird das ehrgeizige Ziel verfolgt, die vollständige FRMCS-Versorgung eines landesweiten Eisenbahnnetzes über öffentliche Mobilfunknetze zu erreichen. Bereits im Frühjahr 2019 gab es erste Überlegungen für Testläufe, die aufzeigen sollten, dass öffentliche Mobilfunknetze ohne signifikante Zusatzinvestitionen für kritische Bahnverbindungen geeignet sind. Verschiedene Modellierungen zeigten grundsätzlich die Machbarkeit für ein solches Vorhaben, sodass im Jahr 2021 schließlich erste Mobilfunkmessungen entlang der finnischen Bahnstrecken vorgenommen wurden. Zu diesem Zeitpunkt waren drei Mobilfunknetzbetreiber in Finnland aktiv, die zwar alle eine landesweite LTE-Versorgung aufwiesen, jedoch nur punktuell eine 5G-Abdeckung gewährleisten konnten. Zugleich ergaben die Messfahrten aber auch, dass lediglich 18 km des insgesamt über 6.000 Streckenkilometer umfassenden Eisenbahnnetzes über keine Mobilfunkversorgung verfügten.

Das Digirail-Vorhaben sollte vor diesem Hintergrund über weitere Messfahrten die reale Mobilfunkversorgung entlang der Strecken zu verschiedenen Parametern der Versorgungsgüte ermitteln. Die dabei erfassten Datensätze enthielten u. a. die anliegenden und angrenzenden Netz- und Cell-ID, die gemessene Sendeleistung sowie Signalgüte

inkl. Verzögerungen, Jitter und Paketverlusten. Darüber hinaus wurden Interferenzen, Signalabbrüche sowie genutzte und verfügbare Frequenzen (700 MHz bis 3.500 MHz) erfasst. Die Testreihen wurden im Zeitraum von März bis August 2022 durchgeführt und ergaben in der Auswertung eine positive Prognose zur Umsetzung des Vorhabens.

Im Anschluss wurde eine bereits inaktive Teststrecke ausgewählt, auf welcher die Umsetzung von FRMCS über öffentlichen Mobilfunk im Live-Betrieb getestet werden konnte. Auf der 69 km langen ETCS-Strecke Kouvola-Kotka-Hamina (Baseline 3) konnten Testzyklen über ein Jahr lang ohne Funkstörungen durchgeführt werden.³⁰ Die FRMCS-Versorgung erfolgte dort zunächst ausschließlich über LTE-Netzwerke. Der erste, zukünftig kommerziell genutzte Streckenabschnitt wird derzeit projektiert. Auf dem 190 km langen Streckenabschnitt Lielähti-Pori/Rauma (Baseline 4) werden derzeit die technischen Voraussetzungen für einen Testbetrieb geschaffen. Der Kick-Off soll im Oktober 2026 erfolgen und sowohl LTE-, als auch 5G-Netzwerke beinhalten. Sofern dieser Testlauf ebenfalls erfolgreich verlaufen sollte, ist der sukzessive landesweite Roll-out von FRMCS über öffentliche Mobilfunknetze im Zeitraum von 2028 bis 2040 geplant.

28 Vgl.: European Commission, Scandinavian–Mediterranean corridor, https://transport.ec.europa.eu/transport-themes/infrastructure-and-investment/trans-european-transport-network-ten-t/scandinavian-mediterranean-corridor_en, zuletzt abgerufen am 14.04.2026.

29 Digirail. Towards ETCS over FRMCS in Finland - Return of experience on LTE/5G based deployment, https://www.era.europa.eu/system/files/2022-12/1_-_towards_etcs_over_frmcs_in_finland_-_rex_on_lte5g_based_deployment_jari_pylvanainen.pdf, zuletzt abgerufen am 14.04.2026

30 Vgl.: DigiRata, Finland's path towards FRMCS: commercial radio networks are key, <https://digirata.fi/en/finlands-path-towards-frmcs-commercial-radio-networks-are-key/>, zuletzt abgerufen am 14.04.2026.

INFO

FP2-MORANE-2

(Flagship Project 2 – MOBILE radio for RAILway Networks in Europe 2)³⁰

Ziel des Projekts FP2-MORANE-2 ist die Prüfung grundsätzlicher Spezifikationen, Netzsegmentübergängen und der Interoperabilität im Rahmen von dedizierten FRMCS-Piloten.

Das europäische Verbundvorhaben fokussiert sich dabei nicht auf die Entwicklung spezifischer Produkte für die Konfektionierung zukünftiger FRMS-Strecken, sondern auf die grundlegende Standardisierung und Erprobung von Anwendungsfällen und Szenarien. Daraus entsteht ein funktionales und einheitliches grenzüberschreitendes technisches Regelwerk für den FRMS-Einsatz in Europa.

Zur Etablierung von FRMCS als zukünftigen Funkdienst im Eisenbahnbetrieb hat die Europäische Kommission im Rahmen des Horizon-Europe-Programms zusammen mit den Initiativen Europe's Rail (EU-Rail) und European Smart Networks and Services (SNS) Zuschüsse in Höhe von 13,5 Mio. € zur Testung und Validierung von FRMCS-Spezifikationen bereitgestellt.

MORANE-2 läuft über einen Zeitraum von 34 Monaten von Dezember 2024 bis September 2027. Bei den Tests wird Ausrüstung verschiedener namhafter und einschlägiger Komponentenhersteller wie bspw. Ericsson, Kontron, Nokia, Hitachi, Funkwerk, Viavi, Teltronic, Siemens, Alstom und Frequentis.

Im Rahmen des Projekts sind Testfahrten auf Strecken innerhalb der folgenden Schienennetze geplant:

- **Spanien (ADIF):** Test grundlegender FRMCS-Funktionen und Systemleistungstests auf 900/1.900 MHz.
- **Schweden (Trafikverket):** Zusammenschaltung von PMNO- und FRMCS-Netzen über ein MOCN-Konzept.
- **Deutschland (DB InfraGO):** Tests zu FRMCS-1.900-MHz-basierten Grenzübergangsszenarien sowie FRMCS/GSM-R Interworking (Sprach- und Datendienste).
- **Spanien HS (ADIF):** FRMCS-Leistungs- und Funktionstests für Hochgeschwindigkeitstrassen (300 km/h).
- **Niederlande (ProRail):** Multipath-Funktionalität in hybriden FRMCS-Netzen (Public Mobile Network Operator und FRMCS-Handover).³¹

31 Hohfeld, B.; Ruhrig, P. (2025): B. Hohfeld; P. Ruhrig (2025), MORANE-2: Der finale Validierungsschritt für FRMCS Edition 1, in: SIGNAL + DRAHT, 117(5), https://digitale-schiene-deutschland.de/Downloads/42_49_Koernicke_etal.pdf, zuletzt abgerufen am 13.04.2026.

32 Das ProRail-Projekt in den Niederlanden ist nach Angaben des Ausrüsters Alstom erst zum 4. Quartal 2025 vollständig implementiert worden. Der Test, in welchem auch öffentliche Mobilfunknetze zum Einsatz kommen sollen, verläuft entlang der Strecke Arnheim – Emmerich. Die Strecke befindet sich derzeit auf deutscher Seite im Abschnitt Oberhausen-Emmerich in Generalsanierung im Zuge der TEN-Korridor-Sanierung Genua-Rotterdam. Vgl.: dB InfraGO AG, Von Rotterdam bis Genua, <https://www.emmerich-oberhausen.de/das-projekt>, zuletzt abgerufen am 14.04.2026.

2.7 Zwischenfazit

Die Recherche zu linienförmigen Mobilfunkinfrastrukturen in ausgewählten Ländern zeigt, dass die Versorgung von Bahnstrecken mit Mobilfunk mittels eigens dafür konzipierter und gebauter Infrastruktur noch nicht intensiv verfolgt wird. Vereinzelte Projekte bzw. Ansätze lassen sich in einigen Ländern jedoch bereits identifizieren (Japan, Schweiz, Spanien). Ein tatsächlicher oder beabsichtigter flächendeckender Ausbau von Bahnstrecken mit Gigabitgeschwindigkeit lässt sich aus den öffentlich zugänglichen Quellen jedoch nicht ableiten. Angesichts der mit dem Ausbau verbundenen hohen Kosten zielen viele Länder bisher darauf ab, die Mobilfunkversorgung mit Frequenzen unterhalb von 3,6 GHz zu realisieren. Festzuhalten ist aber, dass eine hochleistungsfähige Mobilfunkversorgung der Bahnreisenden entlang der Trassen nur als gemeinschaftliche Aufgabe zu bewerkstelligen ist. So stehen in allen skizzierten Beispielen Lösungsansätze im Vordergrund, in denen sowohl die Mobilfunknetzbetreiber als auch das jeweilige Bahnunternehmen kooperativ agieren, um die Versorgungssituation in den Zügen

mit Mobilfunk zu verbessern. Mit Blick auf ein optimiertes Versorgungsszenario entlang deutscher Hochgeschwindigkeitstrassen sollten sich daher sowohl die Mobilfunknetzbetreiber von ihren bisherigen separaten Ausbaustrategien lösen und verstärkt Kooperationen eingehen als auch die Deutsche Bahn und ihre Infrastrukturgesellschaften gemeinsam mit den Mobilfunknetzbetreibern agieren. Dies umfasst die Bereitstellung geeigneter Liegenschaften und Flächen ebenso wie den Ausbau von Glasfaserleitungen bis hin zum Aufbau passiver und aktiver Mobilfunkinfrastrukturen. In einem solchen Szenario wird vor allem die Deutsche Bahn eine zentrale Rolle einnehmen, um die Koordination und Realisierung für eine dedizierte und hochleistungsfähige Mobilfunkversorgung entlang der Bahntrassen zu orchestrieren. Daran anknüpfend sind aber auch die Mobilfunknetzbetreiber angehalten, kooperative Lösungsansätze im Einklang mit den durch die Deutsche Bahn gesetzten Rahmenbedingungen zu ermöglichen.

Vor diesem Hintergrund könnte Deutschland bei der Einführung einer flächendeckenden linienförmigen Mobilfunkinfrastruktur entlang der Gleise mit Frequenzen von 3,6 GHz und höher eine weltweite Vorreiterrolle einnehmen und technische Pionierarbeit leisten, die nicht zuletzt auch als Blaupause für andere Länder dienen könnte.

Kapitel 3

Technische Herausforderungen für die Versorgung entlang von Hochgeschwindigkeitsbahntrassen mit Gigabitdatenraten

Die Versorgung von Hochgeschwindigkeitsbahntrassen im Gigabitbereich erfordert einen Netzaufbau, der sich von den aktuell vorhandenen Mobilfunknetzen in wichtigen Punkten unterscheidet. Die Gründe dafür liegen in der hohen Geschwindigkeit der Züge, den hohen Nutzerzahlen und dem schmalen Versorgungskorridor entlang der Gleisstrecken.

Beispiel für den Dopplereffekt: Das Martinshorn eines Krankenzugwagens. Fährt der Krankenzug auf eine Person zu, klingt der Ton für diese Person höher. Fährt er an der Person vorbei und entfernt sich, klingt der Ton tiefer. Der Ton selbst ändert sich dabei nicht, lediglich die Bewegung zwischen Schallquelle und dem Zuhörer verändert die wahrgenommene Tonhöhe. Dasselbe Prinzip gilt auch für Funkwellen.

Die Versorgung von Nutzenden bei extrem hohen Geschwindigkeiten muss gewährleistet sein. ICE-Züge fahren in Deutschland aktuell auf den Hochgeschwindigkeitstrassen mit maximal 300 km/h, bspw. auf der ICE-Strecke zwischen Nürnberg und Ingolstadt. Es werden also deutlich höhere Geschwindigkeiten erreicht, als dies bspw. mit Autos auf Autobahnen der Fall ist.

Insbesondere die Kombination sehr hoher Geschwindigkeiten des Verkehrsmittels bei gleichzeitig sehr hohen Datenraten ist technisch eine Herausforderung. Die Anforderung an Datenraten im Gigabitbereich macht den Einsatz von Frequenzen notwendig, die über eine entsprechend hohe Kanalbandbreite verfügen. Diese liegen typischerweise in hohen Frequenzbereichen. In Deutschland haben die Netzbetreiber momentan nur im Band n78 um 3,6 GHz genug Kanalbandbreite, um Gigabitdatenraten ohne Carrier Aggregation (CA) zu erreichen. Im Millimeterwellenbereich

gibt es noch das Band n258 (24,25 - 27,5 GHz). Dieser Frequenzbereich wurde nicht exklusiv an die Netzbetreiber versteigert. Er kann auf Antrag auch anderen Unternehmen und Institutionen von der BNetzA zugeteilt werden und ist aktuell für den Aufbau von Campusnetzen vorgesehen.³³

Hohe Frequenzbereiche haben jedoch Nachteile – insbesondere bei der Versorgung von Nutzenden, die sich mit hoher Geschwindigkeit bewegen. Der Dopplereffekt verursacht eine Frequenzverschiebung und ist ausgeprägter, je höher der Frequenzbereich liegt. Genauer gesagt: Die Stärke der Frequenzverschiebung ist proportional zur Frequenz, dem Betrag der relativen Geschwindigkeit zwischen Sender und Empfänger sowie dem Kosinus des Einfallswinkels. Die starke Frequenzverschiebung muss bei der Konfiguration des Netzes berücksichtigt werden.

³³ Vgl.: Bundesnetzagentur, Verwaltungsvorschrift für Frequenzzuteilungen für lokale, breitbandige Frequenznutzungen im Frequenzbereich 24,25–27,5 GHz (VV Lokales Breitband 26 GHz), https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Unternehmen_Institutionen/Frequenzen/OffentlicheNetze/LokaleNetze/Verwaltungsvorschrift26GHz_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=5, zuletzt abgerufen am 14.04.2026.

Tabelle 4:

Verschiebung durch den Dopplereffekt bei verschiedenen Geschwindigkeiten und unterschiedlichen Frequenzbereichen. In Deutschland ist das relevante Szenario für eine Gigabitversorgung entlang von Hochgeschwindigkeitstrassen eine Geschwindigkeit von 300 km/h im 3,5 GHz-Bereich.³⁴

Geschwindigkeit (km/h)	Doppler Shift (Hz)							
	Band 39 (1,9 GHz)		Band 40 (2,3 GHz)		Band 41 (2,6 GHz)		Band 42 (3,5 GHz)	
Downlink /Uplink	DL	UL	DL	UL	DL	UL	DL	UL
150	264	528	319	639	361	722	486	972
200	352	704	426	852	481	963	648	1.296
250	440	880	532	1.065	602	1.204	810	1.620
300	528	1.056	639	1.278	722	1.444	972	1.944
350	616	1.231	745	1.491	843	1.685	1.134	2.269
400	704	1.407	852	1.704	963	1.926	1.296	2.593
450	792	1.583	958	1.917	1.083	2.167	1.458	2.917

Neben dem starken Dopplereffekt haben hohe Frequenzen außerdem eine kurze Sendereichweite. Das bedeutet, die Standorte müssen vergleichsweise dicht beieinanderstehen, um eine unterbrechungsfreie Versorgung zu gewährleisten. Auch eine deutlich stärkere Dämpfung durch Hindernisse, wie Bebauung oder Bewuchs, muss bei der Netzplanung berücksichtigt werden.

Das Standardisierungsgremium 3GPP, das für die Weiterentwicklung des Mobilfunks zuständig ist, hat Vorschläge für die Versorgung an Hochgeschwindigkeitsbahnstrecken erarbeitet. Diese Vorschläge werden unter dem Begriff „High Speed Train Scenarios“ (HST-Szenarios) zusammengefasst. In den Vorschlägen werden die Herausforderungen – wie hohe Geschwindigkeit, geringe Sendereichweite und linienförmige Korridore – berücksichtigt.

Die erarbeiteten Szenarien unterscheiden sich insbesondere hinsichtlich des eingesetzten Frequenzbereichs. Das 3GPP unterscheidet zwischen „Frequency Range 1“ (FR1) und „Frequency Range 2“ (FR2)³⁵. FR1 liegt zwischen 410 und 7.125 MHz, FR2 zwischen 26 und 71 GHz. In

Deutschland werden die Frequenzen im Bereich 3,6 GHz und perspektivisch möglicherweise 6 GHz an den Bahnstrecken eingesetzt werden können. Das Band n258 (26 GHz) bietet schon jetzt eine weitere Option für Gigabitdatenraten entlang der Bahnstrecken. Der Einsatz von Frequenzen in FR2 würde aufgrund der schlechteren Ausbreitungseigenschaften noch einmal deutlich geringere Distanzen zwischen den Mobilfunkstandorten voraussetzen.

Der in Abbildung 10 gezeigte Vorschlag für den Netzaufbau entlang von Hochgeschwindigkeitstrassen sieht einen linearen Aufbau der Infrastruktur vor. Die Standorte befinden sich in berechneten Abständen entlang der Strecke und die Antennen sind direkt auf den Streckenverlauf ausgerichtet. Beispiel (A) zeigt den Netzaufbau, wie er bei einem Einsatz der 3,6 GHz-Frequenzen vorgeschlagen wird, Beispiel (B) zeigt den Netzaufbau, wie er beim Einsatz des 26 GHz-Bereichs aussehen könnte.

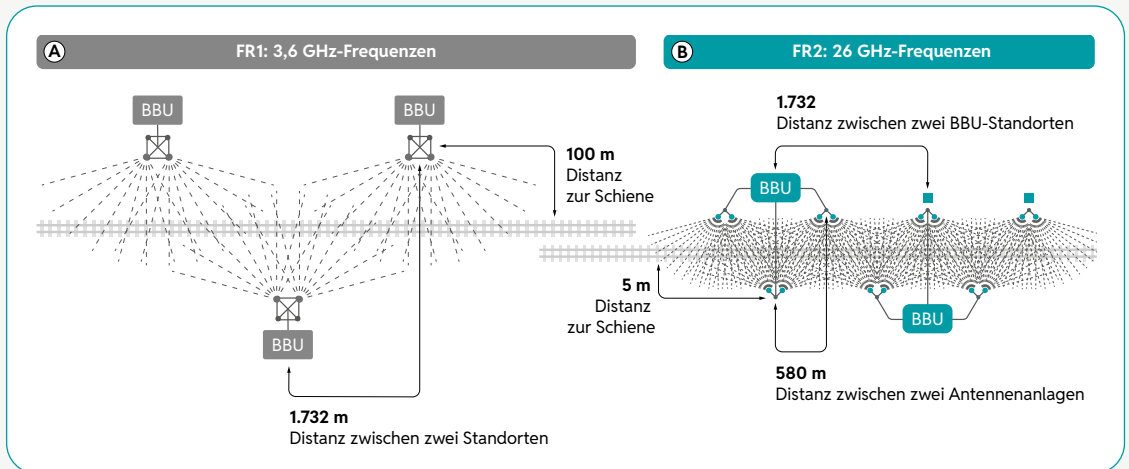
Die Distanzen zwischen den Sendemasten bzw. die Zellgrößen sind für den FR1-Bereich bei 4 GHz mit 1.732 m angegeben. Bei einer Distanz von ca. 1.700 m beträgt die Dämpfung etwa

³⁴ Vgl.: 3GPP TSG-RAN WG4 Meeting #74 R4-150554 https://www.3gpp.org/ftp/tsg_ran/wg4_radio/TSGR4_74/Docs/R4-150554.zip, zuletzt abgerufen am 18.05.2026.

³⁵ FR2 wird auch als Millimeterwellenbereich bezeichnet bzw. ist eine Teilmenge, im Englischen häufig abgekürzt mit „mmWave“.

Abbildung 10: Netzaufbau für 3,6 GHz-Frequenzen (A) und für 26 GHz-Frequenzen (B) entlang des Bahnkorridors.

Quelle: Eigene Darstellung



Versorgung über Relais

Bei diesem Ansatz kommuniziert der Mobilfunkstandort mit einem Empfänger auf dem Zug. Dieser leitet die Daten über ein Relais an die Endgeräte (User Equipment [UE]) im Zug weiter. Dadurch wird die dämpfende Wirkung der Zughülle umgangen.

90 dBm.³⁶ 4 GHz ist in der Darstellung als ein Proxy für den Bereich von 3,3 bis 4,9 GHz zu betrachten. Je nach geplanten Frequenzen wird die Distanz in der Praxis abweichen. Die Standorte befinden sich alternierend auf beiden Seiten der Bahngleise. Bei der Nutzung des FR2 müssen die Standorte deutlich dichter stehen, der Abstand liegt hier bei 580 m. Dabei werden mehrere Standorte von einer Basisstation versorgt.³⁷

Bei der Versorgung der Endgeräte im Zug über einen Empfänger auf dem Zug fällt der Pfadverlust insbesondere bei der Nutzung hoher Frequenzbereiche deutlich geringer aus. Die Endgeräte können im Zug zudem mit geringerer Leistung senden – das senkt die Strahlenbelastung und den Energieverbrauch. Für die Versorgung im Zug können WLAN und/oder Mobilfunkfrequenzen genutzt werden.

Für diese Lösung bedarf es jedoch erheblicher Umbauten an den Zügen: Es müssen Antennen auf dem Dach des Zuges und eine entsprechende Verkabelung und aktive Technik in den Zügen installiert werden. Diesen Aufwand lässt sich umgehen, wenn die Versorgung der

Reisenden auf direktem Weg in den Zug erfolgt. Hier ist zu berücksichtigen, dass bei einer Versorgung durch die Scheiben die Abstände zwischen den Standorten voraussichtlich geringer sein müssen, um die zusätzliche Dämpfung zu kompensieren.

Durch die hohe Geschwindigkeit der Züge von bis zu 300 km/h werden die Mobilfunkstandorte sehr schnell passiert. Um permanente, schnelle Handover zwischen den Mobilfunkstandorten zu verhindern, kann ein Verfahren eingesetzt werden, das als „Single Frequency Network“ (SFN) bezeichnet wird. Mit SFN werden mehrere Remote Radio Heads einer einzelnen Basisstation zugeordnet. Dadurch kann über einen langen Streckenabschnitt die gleiche Cell-ID genutzt werden. Im Bereich der gleichen Cell-ID ist kein Handover notwendig.^{38, 39}

Die geringen Distanzen zwischen den Standorten sind auch notwendig, um in jeder Position des Zuges eine Line of Sight vom UE zur Antenne herzustellen, denn Barrieren wie Bewuchs oder Gebäude zwischen Sender und Empfänger beeinträchtigen die Verbindung in hohen Frequenzbereichen in besonderem Maße.

³⁶ Vgl.: Hasegawa et al (2017). 3GPP standardization activities in relay based 5G high speed train scenarios for the SHF band, (unveröffentlicht).

³⁷ Weitere Annahmen für das HST-Szenario, wie die Anzahl der zu versorgenden Passagiere und die Maximalgeschwindigkeit des Zuges, vgl.: 3GPP TR 38.913 V17.0.0 (2022-03). 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Study on Scenarios and Requirements for Next Generation Access Technologies; (Release 17), https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/38_series/38.913/38913-h00.zip, Seite 14. Zuletzt abgerufen am 18.05.2026.

³⁸ Vgl.: Lin et al, Methods for Downlink Performance Enhancement in HST SFN, https://www.researchgate.net/publication/311897827_Methods_for_downlink_performance_enhancement_in_HST_SFN, zuletzt abgerufen am 18.05.2026.

³⁹ Für die Technologie, mehrere Standorte zu einer Mobilfunkzelle zusammenzuschließen, werden teils unterschiedliche Begriffe verwendet. Möglicherweise gibt es auch Unterschiede in der technischen Umsetzung.

Im Ergebnis zeigen die Vorschläge des 3GPP für HST-Szenarien, dass die Mobilfunkinfrastruktur anders aufgebaut werden muss, als es bei der aktuellen Flächenversorgung der Fall ist. Es wird eine linienförmige Infrastruktur direkt an der Schiene benötigt, um das Ziel einer Gigabitversorgung zu erreichen. Die Standorte müssen

in deutlich geringeren Abständen eingerichtet werden, um eine unterbrechungsfreie Versorgung sicherzustellen. Die Distanz zwischen den Standorten hängt voraussichtlich auch davon ab, ob eine direkte Verbindung durch den Zug hindurch zu den Endgeräten oder über einen Empfänger auf dem Zug geplant wird.

Kapitel 4

Vorschläge für einen wirtschaftlichen Betrieb eines Gigabitnetzes

Es ist unstrittig, dass der Aufbau einer Gigabitinfrastruktur entlang der Bahnstrecken technisch und insbesondere wirtschaftlich für einen Mobilfunknetzbetreiber allein kaum realisierbar ist. Gleichzeitig muss es aber erklärtes Ziel sein, perspektivisch Mobilfunkverbindungen in Gigabitgeschwindigkeiten durch eine lineare Infrastruktur für Bahnreisende bereitzustellen. Was allein kaum möglich ist, kann als gemeinschaftliche Aufgabe sehr wohl gelingen. Im Folgenden werden einige technische Konzepte und Maßnahmen vorgestellt, die zu einer Senkung der Kosten führen können. Alle Maßnahmen setzen einen kooperativen Willen der Mobilfunknetzbetreiber voraus.

4.1 Passives Infrastruktur-Sharing

Aus wirtschaftlichen Überlegungen heraus wird eine lineare Versorgung der Bahnstrecken anders ausgestaltet werden müssen, als dies bei der Flächenversorgung der Fall ist. Die Kosten für eine neue Infrastruktur sind extrem hoch – drei oder vier parallele Infrastrukturen werden die MNBs nicht finanzieren können. Das Sharing der Infrastruktur muss daher auf möglichst vielen Ebenen stattfinden.

Die aus Wettbewerbs- und Akzeptanzgründen am einfachsten umsetzbare Maßnahme zur Reduzierung der Ausbaurkosten, ist der gemeinsame Aufbau und die Nutzung passiver Infrastrukturen – also der erforderlichen Mobilfunkmasten. Schon aus Gründen mangelnden Platzes für Mobilfunkstandorte entlang der Bahnstrecken ist es derzeit praktisch nicht

vorstellbar, dass jeder der vier MNB eine eigene 5G-Infrastruktur entlang der Gleise aufbaut. Die passive Infrastruktur umfasst dabei die Masten zur Montage der Antennen und die notwendige Anbindung an die Glasfaser- und Energieinfrastruktur. In dem Fall, dass jeder Netzbetreiber seine eigene Technik installiert, müssten die Standorte von der Höhe und Statik so ausgelegt werden, dass vier MNBs einen Standort nutzen können. Die Standorte können erheblich kleiner dimensioniert werden, wenn auch ein aktives Sharing stattfindet, also die Netzkomponenten nur einmal verbaut und von allen MNBs genutzt werden. Das im Folgenden dargestellte aktive Sharing in Kombination mit einem Frequenzpooling kann also auch die Investitionskosten für die passive Infrastruktur reduzieren.

4.2 Aktives Infrastruktur-Sharing

Beim aktiven Infrastruktur-Sharing werden aktive technische Netzkomponenten gemeinsam genutzt. Dies betrifft insbesondere Komponenten des Funkzugangsnetzes, des sogenannten Radio Access Network (RAN). Je

nach Ausgestaltung lassen sich dabei vor allem zwei Modelle unterscheiden. Beim Multi-Operator Radio Access Network (MORAN) nutzen mehrere Mobilfunknetzbetreiber die RAN-Infrastruktur eines Standorts gemeinsam, setzen

jedoch jeweils ihr eigenes Frequenzspektrum ein. Beim Multi-Operator Core Network (MOCN) wird neben der RAN-Infrastruktur auch das für die Funkversorgung eingesetzte

Frequenzspektrum gemeinsam genutzt. Die Kernnetze der beteiligten Betreiber bleiben in beiden Modellen grundsätzlich voneinander getrennt.

4.3 Frequenzpooling

Um eine verlässliche und dauerhaft performante Gigabitversorgung für bis zu 1.000 Nutzer:innen in einem Hochgeschwindigkeitszug auch während der Fahrt mit Spitzengeschwindigkeiten von 300 km/h bereitstellen zu können, sind herkömmliche Frequenznutzungskonzepte nur unzureichend geeignet. Dies kann gut an dem Band n78 (3,6 GHz) und der dortigen Zuteilung von Kapazitäten an die vier Mobilfunknetzbetreiber (MNB) verdeutlicht werden. Denn für die gleichzeitige Versorgung vieler Nutzer:innen mit hohen Bandbreiten ist insbesondere das 3,6 GHz-Band unter Einsatz der 5G-Mobilfunktechnologie geeignet: Es kann in Summe einen großen zusammenhängenden Frequenzbereich für den beschriebenen Nutzungszweck in Bezug auf Kapazität und Bandbreite zur Verfügung stellen.

Im Band n78 stehen insgesamt 400 MHz Spektrum zur Verfügung. Davon sind 100 MHz für den Einsatz in lokalen Netzen zur Errichtung von Campusnetzen reserviert.⁴⁰ Bei Betrachtung des zur Verfügung stehenden Frequenzbudgets einzelner Mobilfunknetzbetreiber verfügen die Deutsche Telekom sowie Vodafone im 3,6 GHz-Bereich mit jeweils 90 MHz Spektrum⁴¹ über genügend Kapazität, um theoretisch Datenraten knapp über 1 Gbit/s zu erreichen. Dennoch kann in der Praxis nicht davon ausgegangen werden, dass diese Bandbreite tatsächlich als Bruttodatenrate erzielt werden kann. Aufgrund des Shared-Medium-Charakters des Mobilfunknetzes teilt sich die Gesamtdatenrate nicht nur auf alle in der jeweils versorgenden Mobilfunkzelle befindlichen Teilnehmer:innen auf. Zusätzlich entsteht durch die schnell folgenden Zellwechsel bei hohen Geschwindigkeiten sowie der Dämpfung zwischen den

Mobilfunkantennen und den Endgeräten der Nutzer:innen ein signifikanter Overhead. Dieser beschreibt die Differenz zwischen der Bruttodatenrate, die theoretisch in einer Zelle möglich wäre, und dem tatsächlich verfügbaren Durchsatz (Nettodatenrate), also den Datenpaketen, welche allen Nutzer:innen zur Datenübertragung zur Verfügung stehen.

Darüber hinaus ist zu berücksichtigen, dass Telefónica und 1&1 jeweils nur 70 bzw. 50 MHz an Spektrum im 3,6 GHz-Bereich zur Verfügung stehen. Damit sind über den Einsatz des Bandes n78 allein voraussichtlich keine Gigabitgeschwindigkeiten ohne Zuhilfenahme weiterer Frequenzbänder (Carrier Aggregation [CA]) möglich. Zudem erfordert die Nutzung von CA wiederum weitere Steuerdaten innerhalb des Mobilfunknetzes, um die Frequenzbänder miteinander zu koordinieren. Bei einem schnell fahrenden Zug führt dies zu einem weitaus höheren Netzmanagementaufwand. Aus ökonomischer Sicht ist es nicht sinnvoll, in einer solchen Konstellation primär über die Bündelung vieler unterschiedlicher Frequenzbänder Bandbreite zu erzielen: Mit jedem zusätzlich aggregierten Frequenzband steigt der Aufwand, der in die Koordination und das Management zwischen den Teilnehmer:innen und der Sendereinheit zu investieren ist.

Im betrachteten Szenario soll ein Zug zuverlässig und mit sehr hohen Bandbreiten über Mobilfunk versorgt werden. Den vier Netzbetreibern stehen insgesamt 300 MHz Spektrum im 3,6 GHz-Bereich zur Verfügung. Über Frequenzpooling könnten damit zusammengekommen Datenraten von ca. 2 bis 3 Gbit/s zuverlässig gewährleistet werden.

Ziel: hohe Kapazität in einem Frequenzband

Für eine möglichst hohe Bandbreite ist eine hohe Kapazität an zusammenhängendem Spektrum innerhalb eines Frequenzbandes anzustreben. So kann möglichst viel Bandbreite in einem einzelnen Segment bereitgestellt werden.

⁴⁰ Vgl.: Bundesnetzagentur, Verwaltungsvorschrift für Frequenzzuteilungen für lokale Frequenznutzungen im Frequenzbereich 3.700–3.800 MHz (VV Lokales Breitband), https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Unternehmen_Institutionen/Frequenzen/OeffentlicheNetze/LokaleNetze/Verwaltungsvorschrift3.7-3.8GHz_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=4, zuletzt abgerufen am 14.04.2026.

⁴¹ Vgl.: Bundesnetzagentur, Mobilfunknetze, <https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/Telekommunikation/Frequenzen/OeffentlicheNetze/Mobilfunknetze/mobilfunknetze.html>, zuletzt abgerufen am 14.04.2026.

Wirtschaftlich abbildbar ist der Netzausbau entlang der Schiene mit Blick auf die Erzielung hoher Bandbreitenkapazitäten daher nur durch Kooperationen unter den MNB. Diese beinhalten neben der gemeinsamen Nutzung passiver Infrastrukturen auch ein Sharing aktiver Komponenten, etwa durch Frequenzpooling.

Idealerweise erfolgt dabei das Sharing symmetrisch über alle Netzbetreiber, sodass sich für alle Kund:innen in einer Zelle die Kapazität erhöht und anbieterunabhängig die Möglichkeit der Nutzung der gesamten zur Verfügung stehenden Bandbreite möglich ist.

4.4 Multi-Operator-Core-Network (MOCN)

Frequenzpooling wird technisch über den Einsatz eines Multi-Operator-Core-Network (MOCN) realisiert. Die Nutzung umfasst dabei neben den Sende- und Empfangsanlagen eines Standortes auch die gemeinsame Verwendung der aktiven Technik im gesamten Zugangsnetz bis zum Übergabepunkt.⁴² Der MOCN-Ansatz ist überall dort zu bevorzugen und „für Betreiber von besonderem Interesse, wenn nicht genügend Frequenzen zur Verfügung stehen oder wenn Dienste mit hohem Bandbreitenbedarf bereitgestellt werden sollen.“⁴³

Der MOCN-Ansatz findet in Deutschland bereits Anwendung bei der Mitnutzung bestehender Mobilfunkstandorte im Bereich „grauer Flecken“ der Mobilfunkversorgung. Die Kooperation der MNB hat diesbezüglich die gemeinsame Nutzung des LTE-Bandes 20 um 800 MHz zum Gegenstand und wird seit dem Jahr 2020 aktiv vorangetrieben.⁴⁴ Das MOCN-Verfahren kann somit als eine von den deutschen MNB grundsätzlich akzeptierte und etablierte Variante des Infrastruktur-Sharings bezeichnet werden. Darüber hinaus gibt es auch im europäischen Ausland bereits viele Beispiele von Mobilfunknetzen, die in Einzelfällen sogar landesweit und umfänglich über alle Mobilfunktechnologien

hinweg über aktives Sharing und den Einsatz von MOCN betrieben werden – bspw. das Telia-Telenor-Netzwerk in Dänemark.⁴⁵

Neben der Notwendigkeit eines Frequenzpoolings über das Teilen von aktiven Komponenten, um eine Versorgung der Schienenwege mit Gigabitgeschwindigkeit zu ermöglichen, ergibt sich noch ein weiterer praktischer Grund für den gemeinsamen Aufbau von aktiver und damit einhergehend passiver Infrastruktur entlang der zu versorgenden Bahnstrecken: Entlang der Trassen steht nur begrenzte Fläche für die Positionierung zur Verfügung. Es fehlt daher schlicht der Raum für eine Verdoppelung oder Vervielfachung von Antennenträgern, Sendeanlagen und zuführenden Glasfasertrassen zur An- und Abführung der Datenströme ins Kernnetz

Neben den Investitionskosten können durch das Sharing der aktiven Technik auch die Betriebskosten erheblich gesenkt werden. Der Energieverbrauch einer gemeinsam genutzten aktiven Technik ist deutlich niedriger als der mehrerer, parallel installierter aktiver Komponenten. Die Stromkosten können dadurch erheblich reduziert werden. Auch der Wartungsaufwand für die Anlagen ist entsprechend deutlich geringer.

42 Vgl. Hessische Staatskanzlei, Der Mobilfunkstandard 5G, https://redaktion.hessen-agentur.de/publication/2023/4127_5G-Mobilfunkstandard_DigitalesHessen_Ansicht.pdf, S. 68, zuletzt abgerufen am 14.04.2026.

43 Vgl.: WIK Wissenschaftliches Institut für Infrastruktur und Kommunikationsdienste GmbH, Infrastruktur-Sharing und 5G: Anforderungen an Regulierung, neue wettbewerbliche Konstellationen, https://www.wik.org/fileadmin/files/_migrated/news_files/WIK_Diskussionsbeitrag_Nr_443.pdf, S. 18, zuletzt abgerufen am 14.04.2026.

44 Vgl.: Vodafone, Gemeinsam gegen „graue Flecken“, <https://newsroom.vodafone.de/gemeinsam-gegen-graue-flecken>, zuletzt abgerufen am 14.04.2026.

45 Vgl.: Nokia, Nokia, Telenor and Telia create the world's most advanced shared wireless network in Denmark, <https://www.nokia.com/newsroom/nokia-telenor-and-telia-create-the-worlds-most-advanced-shared-wireless-network-in-denmark/>, zuletzt abgerufen am 14.04.2026.

4.5 Regulatorische Grundlagen für Frequenzpooling

Die regulatorische Grundlage für ein mögliches Frequenzpooling entlang von Hochgeschwindigkeitstrassen ergibt sich aus § 101 des Telekommunikationsgesetzes (TKG). Demnach kann die Bundesnetzagentur „Frequenzbereiche bestimmen, in denen sie Frequenznutzungsrechte zum Handel, zur Vermietung oder zur kooperativen, gemeinsamen Nutzung (Frequenzpooling) freigibt, um flexible Frequenznutzungen zu ermöglichen.“⁴⁶ Im Falle der gemeinsamen Nutzung von Frequenzspektren eines Frequenzbereiches, welches unterschiedlichen Zuteilungsinhabern zugeschlagen wurde, kann dieses zum Frequenzpooling u. a. freigegeben werden, sofern „die Effizienz der Frequenznutzung gesteigert oder gewahrt wird [...] bzw. [...] keine Verzerrung des Wettbewerbs zu besorgen ist“.⁴⁷ Diese beiden Kriterien können aus unserer Einschätzung im Hinblick auf den Zweck einer übergeordneten Zielsetzung der Schaffung einer verlässlichen Gigabitversorgung entlang von Schienenwegen aus volks- und betriebswirtschaftlicher Sicht sowie Aspekten der Teilhabe aller Reisenden an einer leistungsfähigen Breitbandanbindung als gegeben erachtet werden.

Eine grundlegende Verzerrung des Wettbewerbs zwischen den MNB ist ebenso nicht durch die Einzelmaßnahme der Schaffung einer solchen Infrastruktur zur Versorgung von Hochgeschwindigkeitszügen zu erwarten. Alle MNB können sich weiterhin abseits des Schienenkorridors im Rahmen der Gestaltung ihres Netzausbaus und dem Grad der Güte der Dienstbereitstellung voneinander abgrenzen und differenzieren. Ein Wettbewerb entlang der Bahnstrecken zwischen den MNB wäre hingegen aus den oben genannten Gründen nicht nachhaltig und ökonomisch nicht sinnvoll. Der erforderliche Aufwand würde ohne den gemeinsamen Einsatz des gesamten zur Verfügung stehenden Spektrums den in einem

solchen Szenario entstehenden Nutzen deutlich übersteigen. Das gewünschte Versorgungsziel einer zuverlässigen Gigabitversorgung entlang der Bahnstrecken wäre so voraussichtlich nicht zu erreichen. Ebenfalls ist festzuhalten, dass die gemeinsame Nutzung des zur Verfügung stehenden Frequenzspektrums auch den Regulierungszielen nach § 87 TKG⁴⁸ entsprechen würde, da die Versorgung der Schienenwege mit breitbandigen Datendiensten des öffentlichen Mobilfunks damit weiter nachhaltig gestärkt würde. Es wäre dennoch zu prüfen, ob ein Frequenzpooling den getroffenen Prinzipien des ursprünglichen Vergabeverfahrens der Frequenzzuteilung widersprechen könnte. Dieser Aspekt soll aber nicht Gegenstand dieser Kurzstudie sein und wäre somit gesondert zu betrachten.

Um eine weitere Kapazitätssteigerung für die Erzielung noch höherer Bandbreiten entlang der Trassenkorridore zu ermöglichen, könnte erwogen werden, zusätzlich zu dem 300 MHz Frequenzspektrum, welches den vier MNB im Band n78 zur Verfügung steht, das originär der Nutzung für lokale Netze zugewiesene Spektrum im Umfang von 100 MHz im Bereich von 3,7 bis 3,8 GHz zur Verfügung zu stellen. In Summe wären dann 400 MHz zusammenhängendes Spektrum für die Streckenversorgung vorhanden. Damit könnten noch deutlich höhere Bandbreiten entlang der Trassen ermöglicht und zugleich Kapazitätsreserven hinsichtlich zukünftig weiter steigender Bandbreitenbedarfe der Nutzenden frühzeitig antizipiert werden. Eine Antragstellung könnte durch die Deutsche Bahn oder eine zuständige Infrastrukturgesellschaft hinsichtlich der Nutzung dieses spezifischen Spektrums bei der Bundesnetzagentur erfolgen. Hierbei würde es sich gemäß den Antragsregularien um eine abgegrenzte korridorspezifische Nutzung des Spektrums handeln.

⁴⁶ Vgl.: Bundesamt für Justiz, Telekommunikationsgesetz (TKG), § 101, https://www.gesetze-im-internet.de/tkg_2021/_101.html, zuletzt abgerufen am 14.04.2026.“

⁴⁷ Vgl.: ebd.

⁴⁸ Vgl.: Bundesamt für Justiz, Telekommunikationsgesetz (TKG), § 87, https://www.gesetze-im-internet.de/tkg_2021/_87.html, zuletzt abgerufen am 14.04.2026.

Jedoch ist auch zu beachten, dass es derzeit einen grundsätzlichen Ausschluss von Frequenzinhabern der 700 MHz- oder 3,6 GHz-Frequenzen (bundesweite Frequenzen) bei der Beantragung lokalen Spektrums gibt und diese zusätzlichen 100 MHz zugleich derzeit nicht für öffentliche Kommunikationsdienste genutzt

werden dürfen. Dennoch wäre eine regulatorische Umwidmung des betroffenen Spektrums für diesen einen spezifischen Zweck unter der Prämisse einer dort lokal eingegrenzten Nutzung ein erwägenswerter Baustein zur Realisierung einer hochperformanten Versorgung entlang der Schnellfahrstrecken.

Kapitel 5

Weitere Handlungsempfehlungen

Berücksichtigung von 6 GHz-Frequenzen als potientiell zukünftiges Upgrade:

Auf der Weltfunkkonferenz 2023 wurde die Nutzung des Frequenzbereichs von 6.425 - 7.125 MHz (7 GHz-Band) thematisiert.⁴⁹ Mit diesem Frequenzbereich könnte die Datenrate noch einmal deutlich gesteigert werden. Beim Netzaufbau sollte diese Option, sofern notwendig, berücksichtigt werden.

Aktives Sharing und Frequenzpooling nutzen:

Durch aktives Sharing der Netzkomponenten können erhebliche Investitions- und Betriebskosten eingespart werden. Auch die passive Infrastruktur kann kleiner dimensioniert werden, wenn die aktive Technik nicht für jeden Netzbetreiber einzeln, sondern nur einmal für alle installiert werden muss.

Insgesamt verfügen die Netzbetreiber über 300 MHz Frequenzspektrum in Band n78. Die gemeinsame Nutzung des gesamten Frequenzbereichs würde eine maximal effiziente Nutzung der Frequenzen ermöglichen. Der Effekt, dass Frequenzen nicht genutzt werden, weil die Nutzer:innen im „falschen Netz“ sind, kann dadurch ausgeschlossen werden.

Campusnetz-Frequenzen mitnutzen:

Die sogenannten Campusnetz-Frequenzen zwischen 3,7 und 3,8 GHz grenzen direkt an das 3,6 GHz-Frequenzband der MNB (Abb. 2). Eine Aggregation der Frequenzen beim Frequenzpooling wäre daher technisch unkompliziert. Durch die Integration der

Campusnetz-Frequenzen kann die Kapazität signifikant von 300 auf 400 MHz Kanalbandbreite erhöht werden, was einem Anstieg der Datenrate von ca. 1 Gbit/s entspricht. Andere Nutzer:innen dieser Frequenzen sollten durch den begrenzten Einsatzbereich kaum beeinträchtigt werden.

Synergien mit FRMCS beim Bau der passiven Infrastruktur nutzen:

FRMCS hat ein anderes Anforderungsprofil (Critical statt Broadband) und nutzt einen anderen Frequenzbereich, jedoch lassen sich Synergien beim Ausbau der Infrastruktur heben.

Die Standorte für FRMCS sollten so geplant werden, dass die Netzkomponenten für das kommerzielle Gigabitmobilfunknetz auch an den FRMCS-Standorten installiert werden können.

Dafür ist bei der Netzplanung entsprechender Platz für Antennen, Glasfaseranbindung, Strom und die Position des Standortes zu berücksichtigen.

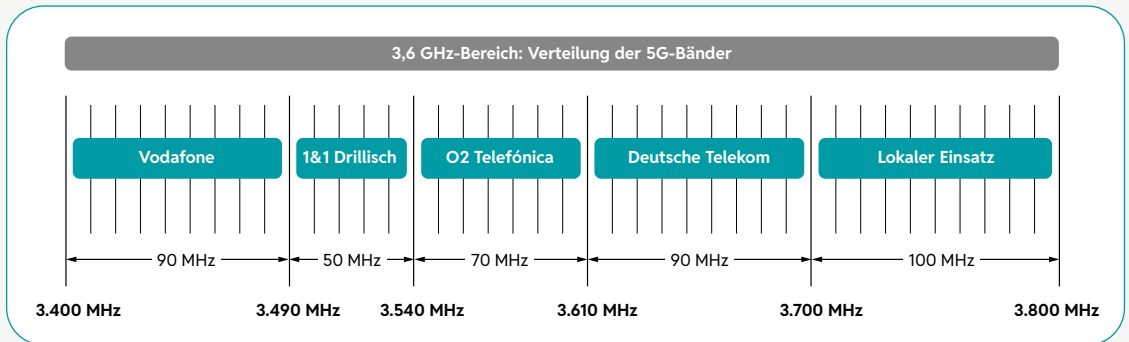
Mitnutzung öffentlicher passiver Infrastrukturen:

Zur Beschleunigung eines schnellen, effizienten und ressourcenschonenden Netzausbaus sowie zur Verbesserung der Mobilfunkversorgung entlang der Bahnstrecken wäre die Verpflichtung der Frequenzzuteilungsinhaber zur Mitnutzung geeigneter passiver Infrastrukturen (§ 3 Nr. 45 TKG) erstrebenswert

⁴⁹ Vgl.: Bundesnetzagentur, Frequenzkompass 2020, https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Unternehmen_Institutionen/Frequenzen/OffentlicheNetze/Mobilfunk/Frequenzkompass2020.pdf?__blob=publicationFile&v=1, S. 9, zuletzt abgerufen am 14.04.2026.“

Abbildung 11:
Der Frequenzbereich 3,6 GHz hat mit den Campus-netz-Frequenzen insgesamt 400 MHz Kanalbandbreite.

Quelle:
5G-anbieter.info.



Verzeichnisse

Abbildungen

Titelmotiv und U2: KI generiert.

Abbildung 1: Teile der Bahnstrecken (hier ein Teilstück zwischen Berlin und Hamburg) sind nur sehr schlecht mit Mobilfunk versorgt. Das liegt unter anderem an zu großen Distanzen zwischen den Standorten. Um diese Entfernungen zu überwinden, müssen Frequenzen unter 1 GHz eingesetzt werden, die jedoch nur vergleichsweise geringe Datenraten ermöglichen.	5
Abbildung 2: Darstellung der Lose mit den jeweiligen Ausbaustrecken.	9
Abbildung 3: Verteilung der Glasfasern entlang der Bahnschienen.	12
Abbildung 4: Darstellung verschiedener Active-Sharing-Modelle. Für die Mobilfunkversorgung entlang der Hochgeschwindigkeitsstrecken in Spanien wird das MORAN-Konzept (mittlere Darstellung) genutzt. Jeder Netzbetreiber kann sein eigenes Frequenzspektrum nutzen. Frequenzpooling ist nicht vorgesehen.	13
Abbildung 5: Funknetzaufbau, verwendete Frequenzen und Dämpfungswerte für die direkte Versorgung der Reisenden im Zug. Die geringe Signaldämpfung im Außenbereich des Zuges stellt sicher, dass auch im Zuginneren – trotz der hohen Dämpfung – eine ausreichende Versorgungsqualität gewährleistet ist.	14
Abbildung 6: Funknetzaufbau, verwendete Frequenzen und Dämpfungswerte für die direkte Versorgung der Reisenden im Zug. Die geringe Signaldämpfung im Außenbereich des Zuges stellt sicher, dass auch im Zuginneren – trotz der hohen Dämpfung – eine ausreichende Versorgungsqualität gewährleistet ist.	15
Abbildung 7: Grundsätzlicher Standortaufbau im Rahmen des Projektes PROGMO.	21
Abbildung 8: Änderungen am Standortkonzept im Rahmen von PROGMO+	22
Abbildung 9: Testkorridor zum Systemübergang zwischen FRMCS- und öffentlichem Mobilfunknetz entlang der Strecke Katrineholm – Åby.	23
Abbildung 10: Netzaufbau für 3,6 GHz-Frequenzen (A) und für 26 GHz-Frequenzen (B) entlang des Bahnkorridors. Quelle: eigene Darstellung.	29
Abbildung 11: Der Frequenzbereich 3,6 GHz hat mit den Campusnetz-Frequenzen insgesamt 400 MHz Kanalbandbreite.	37

Tabellen

Tabelle 1: Aufteilung der drei Ausschreibungslose. 10

Tabelle 2: Kosten für die Nutzung des Mobilfunknetzes an den Hochgeschwindigkeitsstrecken.. .16

Tabelle 3: Kennzahlen zum KBK 19

Tabelle 4: Verschiebung durch den Dopplereffekt bei verschiedenen Geschwindigkeiten und unterschiedlichen Frequenzbereichen. In Deutschland ist das relevante Szenario für eine Giga-bitversorgung entlang von Hochgeschwindigkeitstrassen eine Geschwindigkeit von 300 km/h im 3,5 GHz-Bereich. 28



aconium GmbH

Friedrichstraße 102 | 10117 Berlin
E-Mail: info@aconium.eu | Fon: +49 30 22183-0
www.aconium.eu

Tim Brauckmüller | Geschäftsführer
AG Berlin Charlottenburg | HRB 111699

Stand: Mai 2026
