



Ist die Bahnfunkinfrastruktur in Deutschland stabil?

Zur Resilienz vom GSM-R-Bahnfunknetz und insbesondere FRMCS in Deutschland

Der vorliegende Beitrag nimmt den großflächigen Bahnausfall bei der DB vom 23. Juni 2026 zum Anlass, einen Vergleich zwischen dem GSM-R-Bahnfunknetz und neuen Mobilfunkstandards, insbesondere dem Future Rail Mobile Communication System (FRMCS), anzustellen.

Das GSM-R-Netz der Deutschen Bahn erfüllt hohe Sicherheitsstandards, ist aber insofern vulnerabel, weil es ein hierarchisches, zentralistisches Spezialnetz ist, dessen Ausfall – wie großflächig am 23. Juni 2026 geschehen – den gesamten Bahnverkehr lahmlegen kann.

Ähnlich wie die aktuelle Mobilfunkinfrastruktur soll das zukünftige FRMCS der Deutschen Bahn auf dem neuen Mobilfunkstandard 5G basieren. Dies verspricht mehr Sicherheit und Resilienz gegenüber Störungen sowie damit die Unterstützung von automatisiertem und effizienterem Bahnverkehr.

Seitens der Autoren legen wir mittels eines Vergleiches die Unterschiede zu Robustheit und technischer Auslegung beider Systeme dar und möchten damit zur fachlichen Einordnung, insbesondere im Kontext des aktuellen Vorfalles beitragen.

Öffentliche Mobilfunknetze vs. GSM-R-Netz der Deutschen Bahn

Die öffentliche Mobilfunkinfrastruktur hat mit 5G eine Flächenabdeckung von ca. 95 %. Nach wie vor gibt es noch rund 23.500 weiße Flecken, d. h. ca. 7.500 km² ohne Empfang. Die Betreiber sorgen i.d.R. durch ihre Netze für Redundanz – Störungen wirken sich lokal aus, nicht bundesweit.

Das GSM-R-Netz der Deutschen Bahn basiert auf der 2G-GSM-Technologie. Es ist ein exklusives, geschlossenes Netz für Zugsteuerung und Kommunikation. Sein landesweiter Ausfall führt – wie am 23. Juni 2026 für zwei Stunden geschehen – zu einem sofortigen bundesweitem Zugstillstand. Laut Auskunft der Bahn war die Ursache der Tausch eines Switches, einer Netzwerkverteilkomponente, der einen Software-Fehler zur Folge hatte. Dies wäre eigentlich kein Problem gewesen, da die Systeme redundant ausgelegt sind und in diesem Fall auf das Parallelsystem umgeschaltet worden wäre. Allerdings blieb das Umschaltsignal aus und es musste manuell geprüft und umgeschaltet werden.

GSM-R basiert auf einer hierarchischen, zentralistischen Architektur und ist dadurch vergleichsweise vulnerabel, während moderne, öffentliche Netze dezentrale Architekturen und eine Vielzahl adaptiver, flexibler Kommunikationsmechanismen aufweisen. Dienste sind hier lose gekoppelt und bei Ausfall sucht sich das System einfach einen alternativen Server.

Wie sieht die Frequenznutzung des Bahnfunknetzes und des kommerziellen Mobilfunknetzes aktuell aus?

Das öffentliche Mobilfunknetz in Deutschland beruht aktuell auf:

- 2G (GSM): 900 MHz, 1800 MHz
- 4G (LTE): 700, 800, 900, 1500, 1800, 2100, 2600 MHz
- 5G (NR): 700 MHz (n28), 3,6 GHz (n78), 26 GHz (n258)

Durch die breite Frequenzpalette ist eine hohe Flexibilität gegeben. 5G ist gekennzeichnet durch hohe Bandbreiten bis zu 100 MHz Kanalbreite, massiven Multiple-Input-Multiple-Output (MIMO) und Beamforming. Die geringere Reichweite bei hohen Frequenzen bedeutet mehr Zellen aber höhere Kapazität. Zudem basiert 5G auf einer Cloud-nativen Architektur, in der – im Gegensatz zur zentralistischen 2G-GSM-Architektur - Mikroservices dynamisch nach Bedarf installiert werden können. Zudem können für kritische Dienste mittels Virtualisierungstechniken spezifische Kommunikationskanäle, sogenannte Slices, bereitgestellt werden.

Das GSM-R-Netz der Deutsche Bahn beruht auf klassischem, primär leitungsvermitteltem GSM 900:

- Einem exklusiven Band: 876–880 MHz (Uplink), 921–925 MHz (Downlink)
- Feste Kanalbreite: 200 kHz

Durch die sehr schmale Bandbreite hat es eine begrenzte Kapazität, verfügt jedoch über eine hohe Reichweite (900 MHz), was im Bahnbetrieb nützlich für Langstrecken ist. Das GSM-R-Netz verwendet keine MIMO-Technik, keine adaptive Antennentechnik, keine auf flexiblem Service basierte Architektur und keine für kritische Dienste konfigurierbaren Kommunikations-Slices.

Warum ist das GSM-R-Netz der Deutschen Bahn vulnerabel?

Bei GSM-R handelt es sich um eine „Monokultur-Technologie“ – es basiert auf der GSM-2G-Technik von 1991. Öffentliche Netze dagegen nutzen 4G/5G-Technologien, die 20–30 Jahre moderner sind. Die schmalen Frequenzbänder bei GSM-R (nur 4 MHz im Downlink) führen zu einer deutlich begrenzten Redundanz. Das Netz der Bahn weist keine modernen Robustheitsmechanismen auf, wie 5G Cloud-native Architekturen und flexible Funktechnologien mit adaptiver Modulation und Coding, OFDM und MIMO. Dies führt zu deutlich verringerter Resistenz gegenüber Störungen. Problematisch ist beim GSM-R vor allem auch die inflexible zentralistische Architektur - ein Fehler im GSM-R-Core oder im Funknetz kann zu weitflächigem Ausfall führen.

Öffentliche Mobilfunknetze sind technisch robuster, flexibler und leistungsfähiger als GSM-R. Wobei daraus nicht abgeleitet werden kann, dass das öffentliche Mobilfunknetz vollständig resilient ist und für die Zwecke der Bahn genutzt werden kann. Das GSM-R Netzwerk wird durch eine streng hierarchische Struktur verwaltet und gesteuert, ein zentraler Funktionsausfall pflanzt sich schnell im gesamten Netzwerk fort.

Die Deutsche Bahn setzt mit dem sogenannten Future Railway Mobile Communication System (FRMCS) auf die Ablösung des GSM-R durch ein 5G-basiertes, hochrobustes Bahnfunksystem, das die technischen Schwächen des alten Netzes beseitigen soll. Die Umrüstung auf FRMCS ist kein Upgrade, sondern ein kompletter Technologiesprung von 2G auf 5G, von schmalbandig auf breitbandig, von starr auf dynamisch, von einem hierarchischen „Core Netzwerk“ zu einem Dienst-basierten Netzwerk, und damit von vulnerabel auf hochrobust.

FRMCS basiert technologisch auf dem 3GPP-Standard für 5G-Mobilfunknetze, wobei die funktionalen Spezifikationen durch die UIC (Internationaler Eisenbahnverband) vorangetrieben und sukzessive in das europäische Eisenbahnrecht implementiert werden.

Momentan erfolgt die technische Validierung der Spezifikationsversionen 2 und 3 im Rahmen des europäischen Projekts MORANE 2, um bis Ende 2027 den Spezifikations-Freeze der FRMCS-Version 3 („1st Edition“) zu erreichen.

Nach der für 2028 geplanten Finalisierung des rechtlichen und regulatorischen Rahmens durch die EU-Kommission startet ab 2028/2030 der großflächige Technologierollout, welcher die schrittweise Migration und die vollständige Ablösung des abgekündigten GSM-R-Systems einleitet.

Dies spiegelt sich auch im Zeitplan, den die Deutsche Bahn zur Einführung von FRMCS vorsieht:

2026–2028 - Testfelder mit parallelem Betrieb von GSM-R und FRMCS

2028–2032 - Rollout auf Hauptkorridoren

2032–2035 - Abschaltung von GSM-R und Vollbetrieb von FRMCS.

Worin werden sich das zukünftige FRMCS-Bahnfunknetz und das GSM-R Bahnfunknetz unterscheiden?

Das zukünftige FRMCS wird auf den jetzt aktuellen Stand der Technik hinsichtlich Robustheit und Sicherheit optimiert. Es wird über deterministische Latenz und exklusive Frequenzen verfügen, harte Quality-of-Servie (QoS) Profile aufweisen und SIL 4 (Safety Integrity Level 4) zertifizierbar sein. Redundanz wird über zwei Frequenzbänder sichergestellt. FRMCS nutzt eine 5G Stand Alone Core Architektur (5G-SA). Der Technologiesprung im Radionetzwerk setzt sich damit auch im Kernnetzwerk fort. Während GSM-R auf einer starren Hardware-Infrastruktur aufbaut, basiert FRMCS/5G-SA auf einer flexiblen, Cloud-nativen Software-Architektur.

Im direkten Vergleich: GSM-R nutzt proprietäre, fest verdrahtete Punkt-zu-Punkt-Schnittstellen zwischen einzelnen Hardware-Knoten. Während 5G-SA auf eine Service-Based Architecture (SBA) baut, in der Software-Mikroservices flexibel über einen zentralen logischen Bus via Standard-Internetprotokolle (HTTP/2 oder HTTP/3 mit JSON) und REST-APIs kommunizieren. Das heißt, Netzwerk Funktionen werden als Dienste in einer Cloud ausgeführt und wenn eine Node in der Cloud, z.B. durch ein gescheitertes Software-Update, ausfällt, kann eine andere Node den Dienst ausführen.

Des Weiteren sind bei GSM-R Rechenlogik und Sitzungsdaten in einer Hardware gekoppelt; ein Systemausfall trennt sofort alle aktiven Verbindungen, z.B. Fahrerlaubnisse im European-Train-Control-System (ETCS). FRMCS/5G-SA nutzt eine zustandslose Architektur, bei der die Daten zentral in hochverfügbaren Datenbanken liegen. Stürzt eine Kontrollinstanz ab, übernimmt sofort eine neue Software-Instanz die Session nahtlos und unterbrechungsfrei.

Das FRMCS ist damit ein vielversprechender Systemansatz auf dem Weg zu mehr Resilienz - es sollte, trotz der projizierten Aufbauposten, schnellstmöglich realisiert werden.

Resümee

Die Modernisierung des Bahnfunks (GSM-R) muss dringend beschleunigt werden, da das aktuelle System nicht mehr den heutigen Anforderungen entspricht. Die Lösung liegt in der schnellen Einführung von FRMCS, einem 5G-basierten Bahnfunksystem mit exklusiven Frequenzen, deterministischer Latenz, resilienterer Cloud-native Architektur und SIL 4-Zertifizierung, das ab 2026 getestet und bis 2035 flächendeckend ausgerollt werden soll.

Um die Verkehrssicherheit und Digitalisierung der Bahn nicht zu gefährden, müssen die technische Infrastruktur priorisiert, Notfallpläne für GSM-R-Ausfälle, insbesondere für die Migrationszeit, entwickelt und die Zusammenarbeit zwischen Verkehrs-, Digital- und Wirtschaftsministerium gestärkt werden. Die Modernisierung des Bahnfunks ist eine nationale Infrastrukturaufgabe, die nicht weiter verzögert werden darf.

Ansprechpartner (alphabetisch):

Dr.-Ing. Damian Dudek, VDE ITG
Prof. Dr. Klaus Mößner, TU Chemnitz
Prof. Dr.-Ing. Ralf Tönjes, HS Osnabrück
Dr. phil. nat. Matthias Wirth, VDE ITG

Kontakt:

VDE Verband der Elektrotechnik
Elektronik Informationstechnik e.V.
Merianstraße 28
63069 Offenbach am Main
Tel. +49 69 6308-360
damian.dudek@vde.com