

Mobilfunk im Digitalen Knoten Stuttgart

Mobile communication in the Stuttgart Digital Node

Akhil Bhadran | Jenny Dang | Marcel Eckhardt | Fabian Raichle | Peter Reinhart | Ulrich Thude

Funksysteme (GSM-R, FRMCS und öffentlicher Mobilfunk) sind tragende Elemente des Digitalen Knotens Stuttgart (DKS). Während im hochbelasteten Kern des Knotens 2026 noch GSM-R mit besonderen Resilienzmaßnahmen in Betrieb gehen wird, rückt für die ab 2030 geplanten Inbetriebnahmen im Umfeld Future Railway Mobile Communication System (FRMCS) in den Fokus. In einer eng darauf abgestimmten Ausrüstung der meisten in diesem Bereich verkehrenden Triebfahrzeuge liegt ein wesentlicher Schlüssel für ein Funknetz, das eine hohe Qualität bei überschaubaren Kosten erwarten lässt.

1 Motivation

Im Rahmen des DKS wird erstmals ein großer Eisenbahnknoten in Deutschland mit ETCS Level 2 „ohne Signale“ (L2oS), ATO GoA 2 und weiteren neuen Techniken ausgerüstet. Das Pilotprojekt umfasst rund 500 Streckenkilometer sowie zunächst 491 Triebzüge. [1]

Der Bahnbetriebsfunk (GSM-R und FRMCS) dient neben der Sprachkommunikation auch der Datenkommunikation, die beispielsweise für ETCS, ATO GoA 2 sowie Fahrplan- und Diagnose-daten genutzt wird. Er kann auch zu Kapazitätssteigerungen beitragen [2]. Daneben dient der öffentliche Mobilfunk (über vier Anbieter) insbesondere der Sprach- und Datenkommunikation der Fahrgäste, vereinzelt aber auch betrieblichen Zwecken.

Funk war ein wesentlicher Gegenstand früher Überlegungen, ETCS auf der S-Bahn-Stammstrecke Stuttgart einzuführen. [3, 4, 5] 2018 ging daraus der in drei Bausteine gegliederte DKS hervor (Bild 1). Ab Ende 2026 werden pro Tag etwa 1700 Züge erwartet [3, 6].

Die Konzeption, Planung und Umsetzung des Bahnbetriebsfunknetzes bewegen sich in einem Spannungsfeld: Er soll hochwertig und robust sein und auch ausreichend Kapazität sowie kurze Latenzzeiten bieten. Insbesondere bei Parallelausrüstung von GSM-R und FRMCS führt dies jedoch zu einem enormen Infrastrukturaufwand. Parallel würde in die Fahrzeuge zunächst für ETCS (mit GSM-R) und ATO GoA 2 tief eingegriffen, später erneut für FRMCS. In diesem Spannungsfeld wurde für den DKS ein vielschichtiges und integrales Ausrüstungskonzept entwickelt, das weiter optimiert wird.

2 Fahrzeugausrüstung

Ohne eine eng auf die Infrastruktur abgestimmte Ausrüstung der meisten im DKS erwarteten Züge (Triebzüge) wäre die darauf aufbauende Ausrüstung der Infrastruktur nicht denkbar. Im Rahmen eines Modellvorhabens fördert die Bundesrepublik Deutschland die Nachrüstung von Triebfahrzeugen, die im Kernknoten fahren. Davon profitiert insbesondere die Nachrüstung von 333 Nahverkehrstriebzügen. [7]

Die Förderung ist an 24 technische Bedingungen [8] geknüpft, einschließlich konkreter Anforderungen an die Funkausrüstung der Fahrzeuge: diese beinhalten GPRS, EGPRS, das erweiterte GSM-R-

Radio systems (GSM-R, FRMCS and public mobile) are key elements of the Stuttgart Digital Node (Digitaler Knoten Stuttgart, DKS). While GSM-R with special resilience measures will go into operation in the highly stressed core of the node in 2026, the focus will shift to Future Railway Mobile Communication System (FRMCS) for the planned phased commissioning in the surrounding area as from 2030. Closely coordinated equipment for most of the trains operating in this area is key to a radio network that can be expected to deliver high quality at manageable costs.

1 Motivation

As part of the DKS, a major German railway node is being equipped with ETCS Level 2 (without lineside signals/class B), ATO GoA 2 and other technologies for the first time. The pilot project comprises around 500 kilometres of railway lines and initially 491 electric multiple units (EMU).

The railway radio (GSM-R and FRMCS) is used for voice and data communication (such as for ETCS and ATO GoA 2, but also timetable and diagnostic data). It can also contribute to capacity increases. In addition, four mobile network operators (MNO) mainly serve the voice and data communication of passengers, but in some cases also operational purposes.

Mobile communication was a key subject of early considerations to introduce ETCS in the Core of the Stuttgart S-Bahn system. [3, 4, 5] In 2018, this resulted in the DKS, which is divided into three building blocks (fig. 1). Around 1,700 trains per day are expected from the end of 2026 [3, 6].

The design and implementation of the railway communication network are caught in a field of tension: it should be of high quality and robust and also offer sufficient capacity and short latencies. However, this leads to enormous infrastructure costs, especially if GSM-R and FRMCS are equipped in parallel. At the same time, the vehicles would initially be deeply interfered with for the ETCS retrofit (including GSM-R) and ATO GoA 2, and later again for FRMCS. In this area of conflict, a multi-layered and integral equipment concept was developed for the DKS, which is being further optimised.

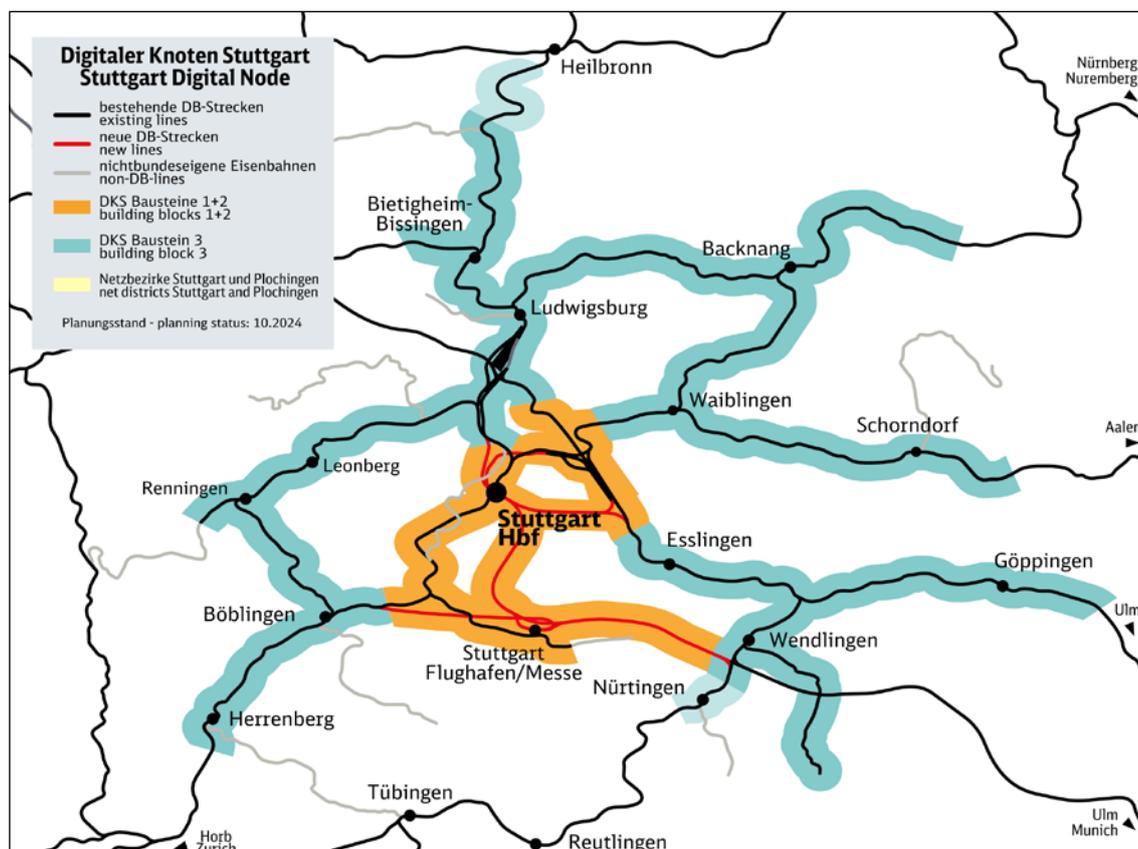
2 Vehicle equipment

Without the equipment of most of the trains (EMU) expected in the DKS being closely coordinated with the infrastructure, the infrastructure equipment based on this would be inconceivable. As part of a model project, the Federal Republic of Germany is partially funding the retrofitting of traction units operating in the core node. In particular, the retrofitting of 333 EMUs for regional transport will benefit from this. [7]

In order to be eligible for funding, 24 technical conditions [8] have to be fulfilled, including specific requirements for the radio equipment of the vehicles: this includes GPRS, EGPRS and the

Bild 1: Übersichtskarte des Digitalen Knotens Stuttgart

Fig. 1: Overview map of the Stuttgart Digital Node
Quelle / Source: DB



Frequenzband, ATO GoA 2 (einschließlich Modem und Antenne für öffentlichen Mobilfunk), Antennen für GSM-R und FRMCS sowie eine Unterstützung von ATO GoA 2 über FRMCS.

Nachdem die Nachrüstung Mitte 2021 an Alstom vergeben worden war, wurden im Rahmen einer Innovationskooperation [9] u. a. ein Lasten- und Pflichtenheft für eine vollwertige und betriebsfähige FRMCS-Ausrüstung ausgearbeitet. Obwohl damals noch nicht einmal die erste Version der FRMCS-Spezifikation vorlag, standen wesentliche Randbedingungen (wie 5G als Grundlage und die Frequenzbänder 900/1900 MHz) bereits fest, um daraus ein Zwei-Stufen-Konzept [10, 11] zu entwickeln und in die Umsetzung zu bringen. Der einschneidende Eingriff, der bereits zur Integration von ETCS und ATO GoA 2 notwendig ist, wird dabei genutzt, um möglichst „aus einem Guss“ auch die Funkausrüstung (GSM-R, FRMCS und öffentlichen Mobilfunk) zu planen und umzusetzen. In der ersten Stufe wurden u. a. Antennen, Kabel und Netboxen mit eingebaut und erste Fahrzeuge inzwischen wieder in Betrieb genommen. In einer zweiten Stufe sollen später lediglich Modems und Filter eingebaut sowie soll ein Softwareupdate durchgeführt werden. [12, 13]

Der Mehraufwand, FRMCS gleich mit auszuschreiben, zu vergeben und mit einzubauen, liegt bei der Seriennachrüstung bei lediglich einigen tausend Euro je Triebzug. [7] Die Planung von ETCS, GSM-R, FRMCS und weiterer Technik erfolgt „aus einem Guss“. Dabei werden beispielsweise alle Funksysteme in der Architektur und der aufeinander abgestimmten Anordnung von Antennen auf dem Dach berücksichtigt. Die in den frühen 2030er Jahren geplante Inbetriebsetzung von FRMCS, im Rahmen des Upgrades auf die zweite Stufe, soll ohne gravierenden Eingriff erfolgen.

Der Ausrüstung liegt ein Worst-Case-Ansatz zugrunde, mit dem die Anforderungen der serienreifen Spezifikation (vgl. Teil der TSI ZZS 2027) voraussichtlich erfüllt werden können. Im Zweifel werden da-

extended GSM-R frequency band, ATO GoA 2 (including modem and antenna for MNO), antennas for GSM-R and FRMCS as well as support for ATO GoA 2 via FRMCS.

After the retrofit of the existing vehicles was awarded to Alstom in mid-2021, a functional specification for a fully-fledged and operational FRMCS equipment was drawn up as part of an innovative cooperation [9]. Although not even the first version of the FRMCS specification was available at the time, significant framework conditions (such as 5G as the basis and the 900/1900 MHz frequency bands) had already been established in order to develop and implement a two-stage concept. [10, 11] The far-reaching intervention, which is already necessary for the integration of ETCS and ATO GoA 2, will be used to plan and implement the technical equipment (GSM-R, FRMCS and public mobile) in a “as a whole” approach as far as possible. In the first stage, antennas, cables and netboxes were installed and the first vehicles have been put back into operation since then. In a second stage, only modems and filters are to be installed and a software update will have to be carried out. [12, 13]

This approach of tendering, awarding and installing FRMCS as an integral part of the retrofit amounts to additional costs of only a few thousand euros per EMU. Within the “as a whole” approach to ETCS, GSM-R, FRMCS and further technologies, all radio systems are taken into account, for example, in the architecture and the coordinated arrangement of antennas on the roof. The commissioning of FRMCS, as part of the upgrade to the second stage in the early 2030s, is expected to avoid another major intervention. This will prevent the need for design changes and further tender processes.

The equipment is based on a worst-case scenario which is expected to meet the requirements of the FRMCS rollout specification (probably part of the TSI CCS 2027). It may lead, for ex-



Bild 2: 4x4-Antennen, die für alle drei Funksysteme genutzt werden können, auf dem Dach eines Coradia Max

Fig. 2: 4x4 antennas, suitable for all three radio systems, on the roof of a Coradia Max train

Quelle / Source: Alstom

mit beispielsweise mehr Antennen eingebaut oder größere Einbau-räume für Filter geschaffen, als bei einer späteren Realisierung notwendig wäre. Auch die in der ersten Stufe eingebaute Technik wird bereits abgenommen und alert, ohne genutzt zu werden. Die Vorteile überwiegen dabei jedoch die potenziellen Nachteile.

Das Land Baden-Württemberg setzt auch bei der Beschaffung von Neufahrzeugen seinen in die Zukunft gerichteten Ansatz durch. Inzwischen wurde auch bei der Beschaffung von 130 neuen Coradia-Max-Doppelstocktriebzügen bei Alstom (Bild 2) sowie von 28 Mireo-Triebzügen bei Siemens die FRMCS-Ausrüstung mit beauftragt. Auch bei einer sich momentan in der Ausschreibung befindlichen BEMU/EMU-Plattform soll FRMCS möglichst mit der 2030 geplanten Auslieferung betriebsbereit sein. [14] Im Rahmen des Vergabeverfahrens haben dies alle Bieter zugesagt.

3 Infrastruktur im Kern (Baustein 1 und 2)

Der Kern des Knotens umfasst rund 120 Streckenkilometer: etwa zur Hälfte den Kernbereich des S-Bahn-Systems (DKS-Baustein 1), der bereits mit GSM-R versorgt ist, sowie die neue Infrastruktur von Stuttgart 21 (S 21, DKS-Baustein 2). Etwa die Hälfte der Infrastruktur liegt in Tunneln. Verkehrlich reicht das Spektrum von der hochbelasteten S-Bahn-Stammstrecke und dem neuen Hauptbahnhof bis zu einem eingleisigen S-Bahn-Ast am Stuttgarter Flughafen, der von zwei Zügen pro Stunde und Richtung befahren wird.

Mit der Entscheidung, im Zuge des DKS den ETCS-Ausrüstungsbereich auszudehnen, bei S 21 auf die zuvor geplante Ausrüstung mit Lichtsignalen und PZB so weit wie möglich zu verzichten [15] und alle Züge im Kernknoten mit ETCS zu fahren, war auch die Konzeption und Planung des Funknetzes grundlegend zu überdenken. Für S 21 war bereits 2012 eine Funknetzplanung begonnen und waren zuletzt 17 Basisstationen (BTS) geplant worden.

ample, to more antennas or larger installation spaces for filters than would be necessary in a later realisation. Also, the components installed in the first stage are already being accepted and are ageing without being used. However, the advantages outweigh the potential disadvantages.

The state of Baden-Württemberg is also pushing this forward-looking approach in the procurement of new vehicles. In the meantime, FRMCS equipment has also been ordered for the procurement of 130 new Coradia Max double-decker trains from Alstom (fig. 2) and 28 Mireo trains from Siemens. Also, a battery/electronic multiple unit platform, which is currently being tendered, should also have FRMCS ready for operation by the time of delivery planned for 2030. [14] All bidders have promised this as part of the tendering procedure.

3 Infrastructure at the core node (building blocks 1 and 2)

The core of the node comprises around 120 kilometres of lines: around half of this is the Core of the S-Bahn system and further tracks (building block 1 of DKS) which is already supplied with GSM-R, and the new Stuttgart 21 infrastructure (S 21, building block 2 of DKS). Around half of the infrastructure is located in tunnels. In terms of traffic, the variety ranges from the highly frequented S-Bahn Core and the new main station to a single-track S-Bahn branch near Stuttgart Airport, which only has two trains per hour and direction.

With the decision for DKS, it has been decided to extend the coverage area for ETCS, to dispense with the previously planned lineside signals/class B equipment of S 21 as far as possible [15] and to run all trains in the core node with ETCS. As a result, the design of the mobile network had to be fundamentally rethought as well. Radio network planning for S 21 had already

3.1 Verfügbarkeit und Resilienz

GSM-R ist im Netz der Deutschen Bahn AG (DB) eine erprobte und zuverlässige Technik, die selbst in ihrem einfachsten Aufbau (Bild 3 links) nur selten ausfällt. Die für ETCS L2oS im DB-Netz geforderte Verfügbarkeit einer funktionsbereiten GSM-R-BTS von 99,992 % wird u. a. durch in Loops angebundene Ketten von drei BTS erreicht (Bild 3 Mitte). Wie eine Analyse der in den Jahren 2015 und 2017 mit ETCS L2oS von in Betrieb genommenen Teilen der VDE 8 zeigte, wird die Verfügbarkeitsanforderung sogar übererfüllt: Es gab von 2018 bis 2020 unter den rund 40 BTS insgesamt 19 Ausfälle. Die Störungen bestanden meist für nur einige Minuten, nur in wenigen Fällen länger als eine Stunde. In den ersten fünf Betriebsjahren war es darüber hinaus zu zwei Ausfällen von übergeordneten Base Station Controllern (BSC) gekommen. Die Auswirkungen blieben meist überschaubar, da Züge in großen Abständen, mit hoher Geschwindigkeit und ohne Halt fahren: Neu aufgetretene Funklöcher konnten durchfahren werden, ohne dass eine nach 40 Sekunden einsetzende Betriebszwangsbremmung [16] darin zum Halt führte. Die Wiederherstellung von GSM-R konnte abgewartet oder wenige Züge umgeleitet werden. Im Kernknoten, mit regelmäßigen 2-Minuten-Zugfolgen und geplanten Halten, hätten hingegen selbst gelegentliche kurzzeitige Funklöcher empfindliche Auswirkungen auf den Bahnbetrieb, würden beispielsweise zu Halten und Rückstaus in Tunneln führen. Um die Verfügbarkeit auf sehr hohem Niveau weiter zu verbessern, wurde zunächst ein durchgehend doppelter Systemaufbau (Dual Layer) erwogen, bei dem ein Sekundärsystem hochgefahren wird, wenn das Primärsystem ausfällt. Dies hätte jedoch nicht nur zu ungefähr doppelt so hohen Kosten geführt, sondern wäre auch betrieblich ungünstig, da eine Störung zunächst erkannt werden müsste, um anschließend die Systeme herunter- bzw. hochzufahren. Der Bahnbetrieb müsste währenddessen ruhen. Ferner hätten die zur Verfügung stehenden „Frequenzen“ zwischen beiden Systemen aufgeteilt werden müssen, womit die Funknetzplanung massiv erschwert worden wäre.

Umgesetzt wird nun eine Lösung mit verdichteten BTS-Abständen (überlappende Funkabdeckung) und einer alternierenden BTS-BSC-Anbindung (Bild 3 rechts). Damit soll der Bahnbetrieb sowohl beim Ausfall einer BTS, einer BTS-Kette wie auch eines BSC nahtlos weiterlaufen. Zwar reißen Verbindungen beim Ausfall sowie bei vielen BTS-Handovers ab, werden aber während des 40-Sekunden-Timers neu aufgebaut. Damit wird im Regelbetrieb ein doppelt so hoher Mindestpegel von -92 dBm statt -95 dBm gewährleistet, im Störfall wenigstens -98 dBm. Der Mehraufwand

begun in 2012 mit 17 Base Stations (BTS) having been planned since then. The field technology installed in the 2000s was due for renewal in the existing area anyway.

3.1 Availability and resilience

GSM-R is a proven and reliable technology in the Deutsche Bahn AG (DB) network that rarely fails, even in its simplest configuration (fig. 3 left). The 99.992 % availability of a functional GSM-R BTS required for ETCS L2 only operation in the DB network is achieved, among other things, by chains of three BTS connected in loops (fig. 3 centre). An analysis on the first ETCS L2 only sections of the DB network (parts of the Nuremberg – Berlin axis, inaugurated in 2015 and 2017) showed, that the availability requirements were even exceeded: There were a total of 19 failures among the approximately 40 BTS from 2018 to 2020. The disruptions usually lasted a few minutes only and in very few cases longer than an hour. In the first five years of operation, there were also two failures of Base Station Controllers (BSC). The effects were mostly manageable, as trains travelled at long intervals, at high speed and without stops: Trains were able to travel through newly occurring dead spots without an automatic service brake application which is triggered 40 seconds after a connection loss [16]. The few affected trains waited for the GSM-R recovery or were diverted.

In the core node, on the other hand, conditions are much more complicated: with regular 2-minute train intervals and planned stops even occasional short-term dead spots would have a serious impact on railway operations, leading to stops and backlogs in tunnels for example. In order to further improve availability at a already very high level, a continuous dual-layer system structure was initially considered, in which a secondary system is started up if the primary system fails. However, this would not only have led to approximately twice the costs but would also have been unfavourable from an operational point of view, as a disruption would first have to be detected before systems could be shut down and backups started up. Railway operations would have to be suspended in the meantime. Furthermore, the available frequencies would have had to be shared between the two systems, which would have made radio network planning much more difficult.

Instead, a solution with condensed BTS spacing (overlapping coverage) and an alternating BTS-BSC connections (fig. 3 right) is now being implemented. This should ensure that railway operations continue seamlessly even if a BTS, a BTS chain or a BSC fails. Although connections are terminated in the event of a failure and at many BTS handovers, they are re-established within the 40 second timer. Dur-

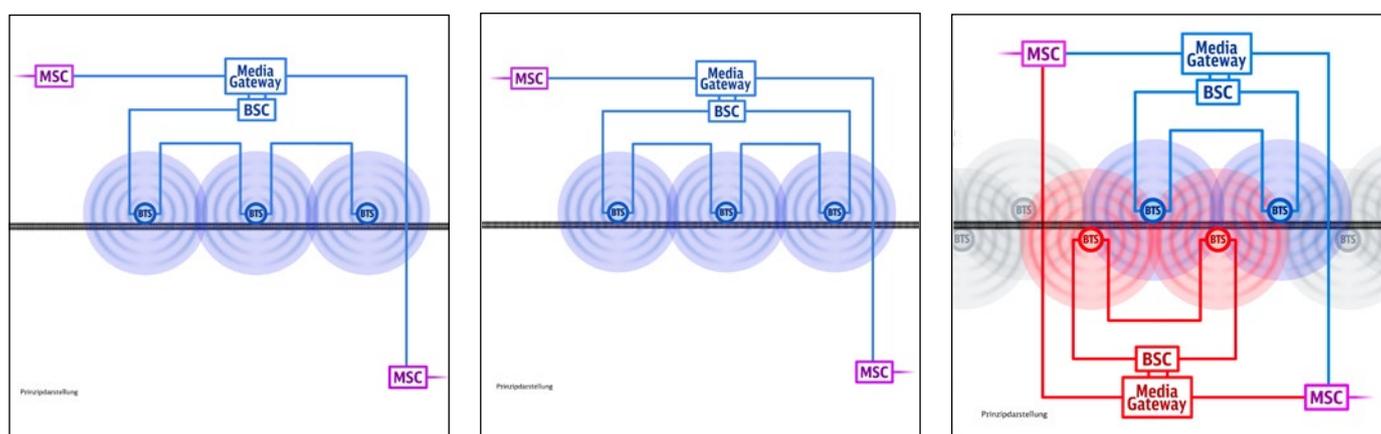


Bild 3: Architektur mit einfacher Kettenanbindung (links), Loop-Anbindung (Mitte) sowie alternierend überlappender Anbindung (rechts)

Fig. 3: Architecture with single connection (left), single looped connection (centre), overlapping alternated single loop connection (left)

Quelle / Source: DB

– einige zusätzliche BTS, eine aufwendigere Verkabelung, jedoch kein zusätzlicher BSC-Neubau – bleibt überschaubar.

Zu einem robusten Funk tragen u. a. auch eine erhöhte Batteriekapazität für schwer zugängliche BTS im Tunnel sowie eine priorisierte Instandsetzung bei. Der Funk ist dabei wiederum nur ein Teil eines robusten und nahezu durchgängig redundanten Gesamtsystems [11, 17], zu dem beispielsweise auch eine Früherkennung von Fahrzeugen ohne betriebsbereites ETCS Level 2 gehört (Dispositive Zufahrtsicherung) [6, 17, 18].

Abseits derartiger Störszenarien vermeidet die Funknetzplanung möglichst planmäßige BTS-Handover an planmäßigen Halten, in ETCS-Einstiegs- sowie RBC-Wechselbereichen. Ein zunächst in bewegtem Gelände geplanter ETCS-Einstieg wurde um mehrere Kilometer stadtauswärts verlegt, um „Ping-Pong-Handover“ zu vermeiden.

3.2 Kapazität

Auf diesen Grundlagen wurden neue und anzupassende BTS-Standorte geplant (Bild 4) und anschließend mit einer Kanalbedarfsermittlung geprüft, ob die Funkkanalkapazität für den Hochleistungsbetrieb mit ETCS L2oS ausreicht. Hierzu wurde ausgewertet, wie viele gleichzeitige Züge mit ETCS im Versorgungsbereich jeder BTS zu erwarten sind. Maßgebend war dafür die Spitzenstunde und eine Unterbrechung des Bahnbetriebs an einer Stelle in allen Gleisen unter der Annahme, dass von allen Seiten noch für einige Minuten Züge in die Funkzelle einfahren, bevor der weitere Zufluss gestoppt wird. Neben mit ETCS geführten Zügen wurden auch zur Abfahrt vorbereitete Züge sowie weiterer Sprach- und Rangierfunk berücksichtigt.

ing normal operation this solution also ensures a minimum level of -92 dBm (twice as much as the required -95 dBm), and at least -98 dBm in the event of a failure. The additional expense – a few additional BTS, more complex cabling, but no additional new BSC – remains manageable.

Increased battery capacity for BTS in tunnels that are difficult to access and prioritized maintenance also contribute to robust mobile network communication. In turn, mobile coverage is only one part of a robust and almost consistently redundant overall system [11, 17], which also includes, for example, an early-warning system for vehicles without operational ETCS Level 2 (DZ) [6, 17, 18].

Apart from such interference scenarios, the mobile network planning avoids scheduled BTS handovers at scheduled stops, in ETCS entry and RBC handover areas as far as possible. An ETCS entry area initially planned in difficult terrain was extended by a few kilometres to avoid “ping-pong handovers”.

3.2 Capacity

On this basis, new and adapted BTS locations were planned (fig. 4) and then a channel requirements analysis was carried out to check whether the radio channel capacity was sufficient for high-performance ETCS L2 only operation. This involved analysing how many simultaneous ETCS trains can be expected in the coverage area of each BTS. This was based on the peak hour and an interruption of railway operations at one point on all tracks, assuming that trains will enter a radio cell from all sides for a few minutes before the further inflow is stopped. In addition to trains operated with ETCS, trains performing start of mission and other voice and shunting communications were also taken into account.

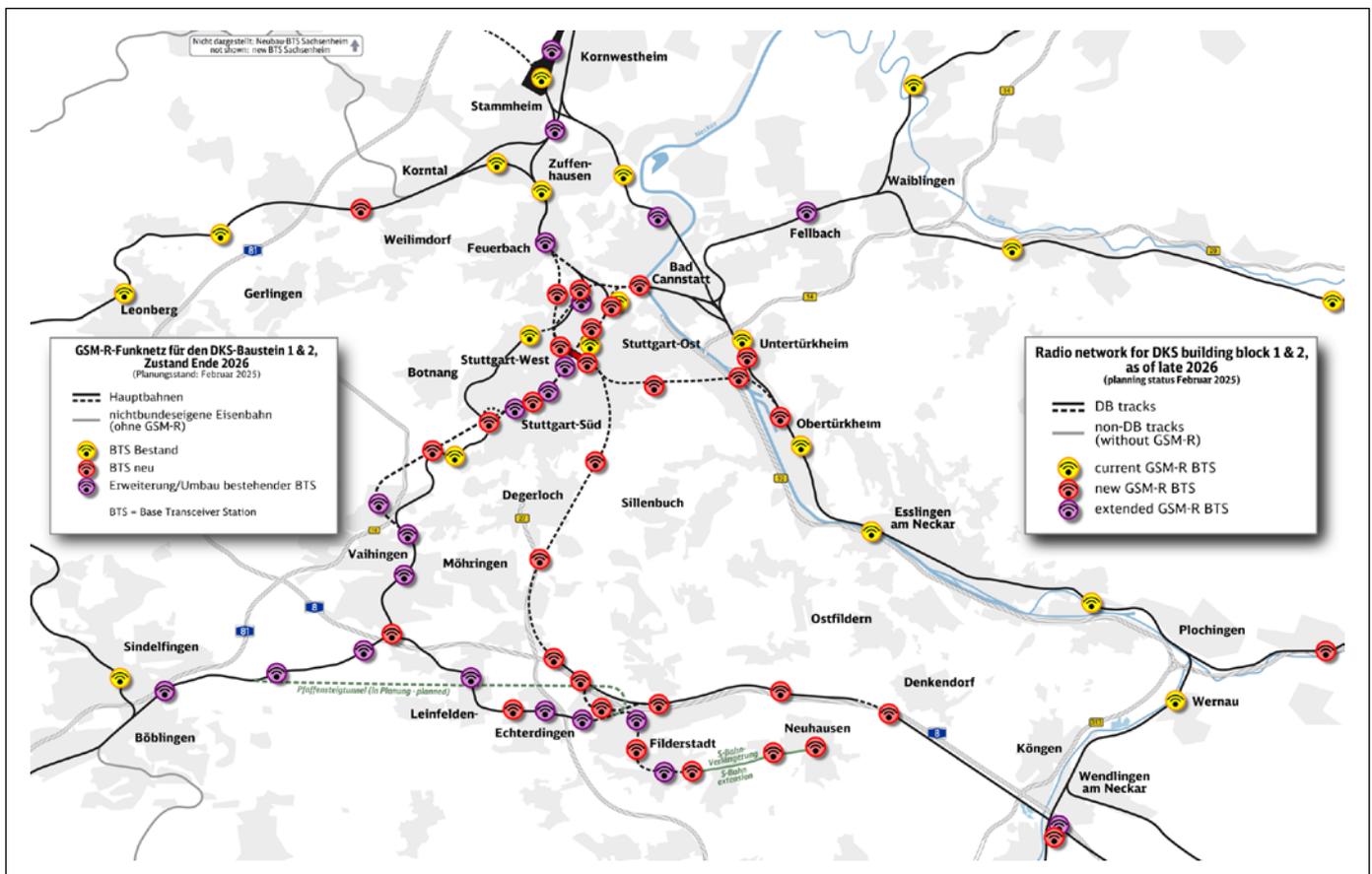


Bild 4: Übersicht der Basisstationen im Raum Stuttgart

Fig. 4: Overview of BTS in the Stuttgart area

Quelle / Source: DB

Der DKS zählt zu den ersten Bereichen im DB-Netz, in denen das erweiterte GSM-R-Frequenzband eingesetzt werden wird, das unterhalb des interoperablen GSM-R-Basisbandes (2x4 MHz, 19 Frequenzkanäle) weitere 2x3 MHz (15 weitere Frequenzkanäle) bereitstellt. Auf jedem Frequenzkanal stehen dabei acht Zeitschlitz zur Verfügung, die für Verbindungen genutzt werden können: Ein in ETCS fahrender Zug oder ein Sprachanruf nimmt jeweils einen Zeitschlitz in Anspruch. Im Kern des DKS werden 2 bis 4 Frequenzkanäle je BTS aufgeschaltet und somit 16 bis 32 Zeitschlitz bereitgestellt. Unter Berücksichtigung von Zeitschlitz, die für Sprachfunk und Organisationsaufgaben des Netzes benötigt werden, stehen je BTS etwa 12 bis 25 Zeitschlitz für ETCS zur Verfügung. Auf jeder BTS wird mindestens ein Frequenzkanal des Basisbandes aufgeschaltet, um die Interoperabilität zu gewährleisten, gleichwohl ein Großteil der erwarteten Züge auch das erweiterte Band beherrscht. Das Netz verschiebt selbstständig Verbindungen mit geeigneten Endgeräten in das erweiterte Band, ebenso von hochausgelasteten in weniger belastete BTS.

GPRS, mit dem Zeitschlitz laufend dynamisch allokiert werden und somit die Zahl der parallel in ETCS geführten Züge ungefähr vervierfacht werden könnte, ist nicht erforderlich. ATO GoA 2, das ebenfalls paketvermittelte Datenübertragung benötigt, läuft zunächst über öffentlichen Mobilfunk, bis FRMCS zur Verfügung steht.

3.3 Erfahrungen aus Planung und Umsetzung

Ein Teil der rund 30 neuen BTS entsteht im Tunnel, andere 10 bis 40 m hohe Masten im Freifeld, weitere versorgen beides. An allen bestehenden BTS wird (ohnehin) Systemtechnik erneuert, im Weiteren werden oftmals zusätzliche Transceiver (TRX) für zusätzliche Frequenzkanäle aufgeschaltet, teils auch Sendeleistungen erhöht. Auch die Festnetzanbindung zwischen BSC und BTS wird grundlegend (mit Glasfasern) umgebaut.

Ein großer Teil der neuen BTS wurde als Teil der S-21-Infrastruktur planfestgestellt. Für die übrigen BTS, die mit dem DKS und der besonders resilienten Funkversorgung hinzukamen, waren zum Teil Planfeststellungs- und Plangenehmigungsverfahren erforderlich. Selbst unter bestmöglichen Bedingungen nehmen die darauf aufbauende AP und Realisierung einer neuen BTS zusammen ein Jahr in Anspruch, in der Regel sind es jedoch mehrere Jahre. Ferner sind jedwede funktechnischen Veränderungen durch das Eisenbahn-Bundesamt (Sachbereich 3) zu genehmigen.

Ein großer Hemmschuh ist dabei ein Mangel an qualifiziertem bzw. zugelassenem Personal für die alte und eisenbahnspezifische Technik: Planer und Planprüfer, Statikprüfer, Bauvorlageberechtigte, Abnahmeprüfer und Bauüberwacher. Diese Fachkräfte wurden und werden letztlich aus ganz Deutschland zusammengezogen und stehen hiermit in Konkurrenz zu anderen Projekten. Auch eine nur teilweise Standardisierung von Prozessen, Bauteilen und Gebäuden erschwert die Realisierung weiter. Im öffentlichen Mobilfunk häufig verwendete Elemente wie Antennenhalterungen benötigen nochmals gesonderte Freigaben und Zulassungen. Auch haben sich die zu erfüllenden Anforderungen im Projektverlauf immer wieder geändert. Die Vielzahl an korrespondierenden Gewerken mit vielen Auftragnehmern in einem langlaufenden Projekt führte zu weiteren Schnittstellen und Erschwernissen [20].

GSM-R-Mobilfunkstandorte sind bislang eher per Hand geplante Manufakturstücke als das Ergebnis einer hochgradig digitalisierten Planung mit einem standardisierten Baukasten. Da viele Know-how-Träger in den kommenden Jahren in den Ruhestand gehen werden und absehbar nur wenige Fachleute nachkommen, müssen neue Wege gefunden werden.

The DKS is one of the first areas in the DB network in which the extended GSM-R frequency band will be used, which provides a further 2x3 MHz (15 additional radio frequency [RF] carriers) below the interoperable GSM-R base band (2x4 MHz, 19 RF carriers). Eight time slots are available on each RF carrier, which can be used for connections: An active ETCS train or a voice call each take up one time slot. At the core of the node, each BTS provided between two and four RF carriers, thus providing 16 to 32 time slots. Taking into account the time slots required for voice radio and control channels of GSM-R network, around 12 to 25 time slots are available for ETCS per BTS. Each BTS provides at least one band RF carrier in order to ensure interoperability, although the majority of the expected trains will also be able to use the extended band. The network automatically shifts connections with suitable devices to the extended band, as well as from busy to less busy BTS.

GPRS, which can be used to dynamically allocate time slots on an ongoing basis and thus roughly quadruple the number of trains running in parallel in ETCS, is not required. ATO GoA 2, which also requires packet-switched data transmission, will initially run via MNO until FRMCS is available.

3.3 Experience from planning and implementation

Some of the around 30 new BTS are being built in tunnels, others use 10 to 40 metre high masts in the open area, others combine both scenarios. At all existing BTS, where field technology was to be renewed anyway, additional transceivers (TRX) for additional RF channels are often added, and in some cases transmission power is also increased. The fixed network connection between BSC and BTS is also upgraded to use fibre optics only.

A large part of the new BTS was officially approved as part of the S 21 infrastructure. For the remaining BTS, which were added with the DKS and its special resilience measures, dedicated federal planning authorisation procedures were required in some cases. Even under the best possible conditions, the subsequent IP and realisation of a new BTS together take a year, but usually several years. Furthermore, any changes to the radio technology must be approved by the German Federal Railway Authority (EBA).

A major stumbling block here is the lack of qualified or approved personnel for the old and railway-specific technology: planners and plan inspectors, structural engineers, authorised construction auditors, acceptance inspectors and construction supervisors. These specialists were and are ultimately brought together from all over Germany this if effort is there therefore in competition with other projects. The partial standardisation of processes, components and buildings makes implementation more complex. Elements frequently used by MNO, such as antenna mounts, require separate approvals and authorisations. The requirements to be fulfilled have also changed repeatedly over the course of the project. The large number of corresponding trades with many contractors in a long-running project led to further interfaces and complications [20].

To date, GSM-R BTS have tended to be planned by hand rather than the result of highly digitised planning with a standardised construction kit. As many experts will be retiring in the coming years and only a few specialists are expected to follow, new ways must be found.

4 Infrastructure in the surrounding area (building block 3)

These mixed experiences were and are a reason to fundamentally rethink the concept of mobile networks for the surrounding area. Also,

4 Infrastruktur im Umfeld (Baustein 3)

Die durchwachsenen Erfahrungen waren und sind ein Grund, die Konzeption des Funks im Baustein 3 grundlegend zu überdenken. Dazu kommen einige andere Randbedingungen: So ist die Verkehrsbelastung geringer, die schrittweisen Inbetriebnahmen erst ab 2030 geplant, die FRMCS-Fahrzeug- und -Infrastrukturausrüstung in diesem Zeithorizont klar absehbar. Auch sind diese Bereiche nahezu durchgehend mit einem für ETCS ausreichenden Pegel (min. -95 dBm) versorgt.

Zunächst war gemäß betrieblicher Aufgabenstellungen geplant, GSM-R im Großteil des Bausteins 3 ebenfalls mit erhöhten Resilienzanforderungen (Bild 3, rechts) auszurüsten. Das hätte zu einigen Dutzend neuen BTS geführt, ohnehin knappe Ressourcen noch stärker belastet und ein erhebliches Umsetzungsrisiko bedeutet. Dieses umfassend ausgebaute Netz wäre voraussichtlich nach wenigen Jahren im Zuge der FRMCS-Migration abgeschaltet worden. Gleichzeitig ist der Aufbau der FRMCS-Infrastruktur ohnehin ein Projektziel, und es soll die Pilotierung von FRMCS in einem großen Knoten im DB-Netz im DKS ab Ende der 2020er Jahre erfolgen.

Vor diesem Hintergrund wurde im Oktober 2024 entschieden, GSM-R nur noch in einem definierten Kernknotenbereich (Bild 5) besonders resilient auszubauen. Dies trägt zum einen der besonders hohen Verkehrsbelastung Rechnung, zum anderen bleiben damit im Falle etwaiger Großstörungen auch ausreichend Wendemöglichkeiten offen. Im übrigen Bereich soll das Bestandsnetz maßvoll und gemäß Regelwerk [21] für ETCS ertüchtigt werden: Durch Loop-Anbindungen (Bild 3, Mitte) wird ein Großteil des rechnerisch möglichen Verfügbarkeitshubes (auf 99,992 %) erreicht. Darüber hinaus wird die Funkkanalkapazität einiger BTS erhöht und werden weitere Optimierungen (z. B. Ausrichtung von

some key boundary conditions are different: For example, the traffic load is lower, phased commissioning is not to begin before late 2030 and FRMCS vehicle and infrastructure equipment is clearly foreseeable in this time horizon. As a fact, the area is already almost fully covered with a level of at least -95 dBm, which is sufficient for ETCS. According to operational project requirements specifications, it was initially planned to equip GSM-R in a large part of the surrounding area with special resilience measures (fig. 3, right). This would have led to dozens of new BTS, put an even greater strain on already scarce resources and meant a considerable implementation risk. This extensively expanded network would probably have been shut down after a few years as part of the FRMCS migration. At the same time, the deployment of the FRMCS infrastructure is a project goal in existence on its own. Also, DKS is the pilot area for FRMCS in a large node in the DB network which to commence in the late 2020s. For these reasons, it was decided to expand GSM-R with special resilience measures only in a defined core node area in October 2024 (fig. 5). On the one hand, this takes into account the particularly high traffic load and, on the other hand, leaves sufficient turning options open in the event of any major disruptions. In the remaining area, the existing network is to be upgraded for ETCS in a moderate manner and in accordance with the DB-internal regulations: Loop connections (fig. 3, centre) will achieve a large part of the calculated possible availability increase (to 99.992 %). In addition, the capacity of some BTS will be increased and further optimisations (e.g. alignment of antennas) will be made. New BTS will probably only be required in a few cases.

With the expected ramp-up of FRMCS rolling stock and infrastructure equipment, a large proportion of trains will soon run ETCS via FRMCS (at 1900 MHz). GSM-R (at 900 MHz) will temporarily serve as a fallback for these trains. After GSM-R is switched off, its band can also be used for FRMCS, approximately doubling the

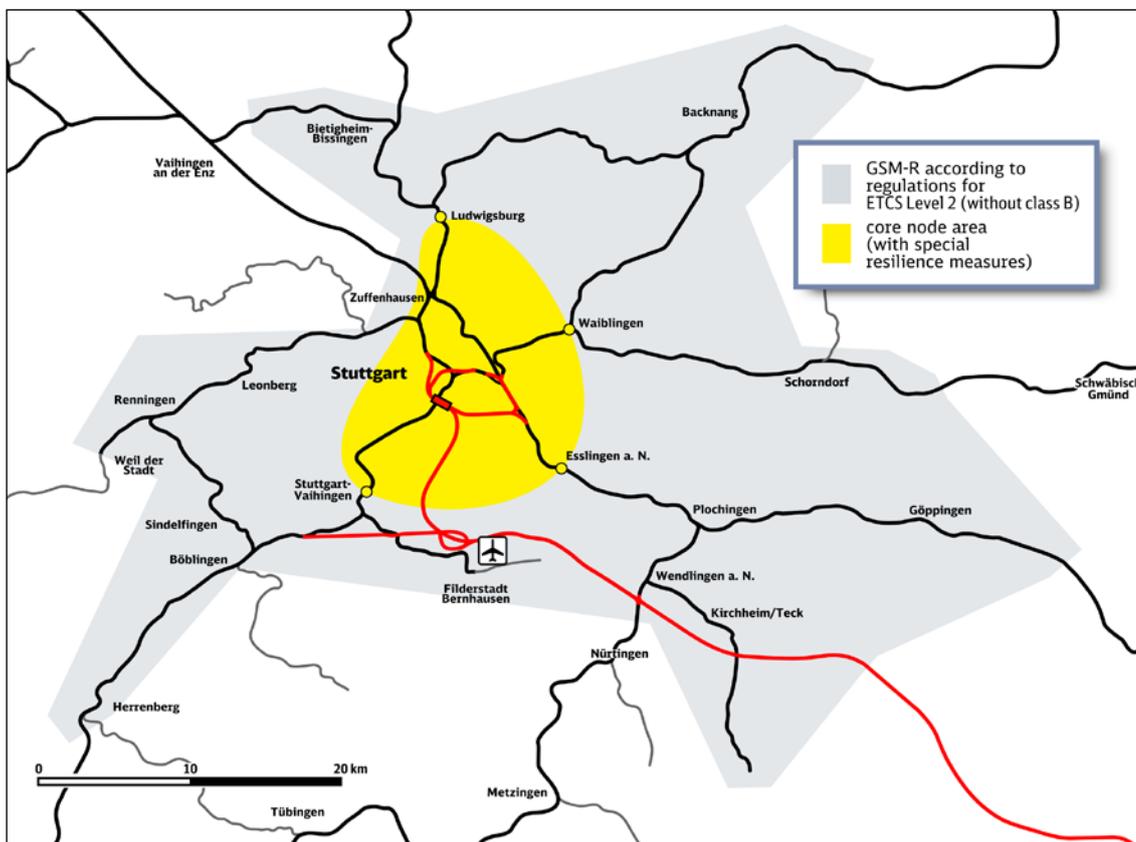


Bild 5: Definierter Kernknotenbereich
 Fig. 5: Defined core node area

Quelle / Source: DB

Antennen) erfolgen. Neue BTS werden voraussichtlich nur in wenigen Fällen erforderlich sein.

Mit dem erwarteten Hochlauf der FRMCS-Fahrzeug- und Infrastrukturausrüstung wird ein großer Teil der Züge mit ETCS über FRMCS (bei 1900 MHz) geführt werden. GSM-R (bei 900 MHz) dient diesen Zügen vorübergehend als Rückfallebene. Nach Abschaltung von GSM-R kann dieses Band für FRMCS mitgenutzt, die Reichweite ungefähr verdoppelt und somit wieder eine Überlappung geschaffen werden. In der Übergangszeit, von voraussichtlich 2030 bis 2035, werden seltene Betriebseinschränkungen bei Störungen toleriert. Gleichzeitig wird damit ein mittlerer zweistelliger Millionenbetrag eingespart.

Für punktuelle neue GSM-R-BTS sowie neue Funkstandorte für FRMCS sollen, wie auch im übrigen Netz der DB InfraGO, nur noch standardisierte Masten (Bild 6) geplant und gebaut werden. Diese sind in der Regel 15 m hoch (in Ausnahmefällen 20 m) und können in der Regel ohne langwieriges Genehmigungsverfahren gebaut werden.

Hierfür werden momentan potenzielle Standorte im Abstand von einem Kilometer gesucht. Damit wäre auch eine Ausrüstung mit besonders breitbandigem öffentlichem 5G-Mobilfunk (bei 3,6/3,7 GHz) denkbar, wofür eine Sichtverbindung zwischen Mast und Zug erforderlich ist. Für FRMCS (bei 1,9 GHz) sind voraussichtlich Abstände von etwa 2 km, für GSM-R (bei 900 MHz) von etwa 4 km erforderlich, wobei erheblich kürzere und größere Abstände aus topografischen Gründen möglich sind.

Aus diesem Pool wählt die Funknetzplanung geeignete Standorte aus. Die Funknetzplanung für GSM-R wurde inzwischen begonnen. Die Funknetzplanung für FRMCS wird u. a. auf der Grundlage der Erkenntnisse aus MORANE 2 [21] voraussichtlich ab etwa 2026/2027 folgen.

5 Resümee und Ausblick

Der DKS zeigt auch beim Funk, dass es alternativlos ist, die Modernisierung und Digitalisierung der Eisenbahn mit Augenmaß gemeinsam zu gestalten und zu optimieren, um gute Lösungen für das Gesamtsystem Bahn zu erreichen. Durch die eng aufeinander abgestimmte Fahrzeug- und Infrastrukturausrüstung reicht GSM-R ohne GPRS im Kernknoten kapazitativ für ETCS L2oS aus. Abseits des Kernknotens vermeidet die mit geringem Mehraufwand mitbeauftragte FRMCS-Ausrüstung vieler Triebzüge einen umfassenden GSM-R-Ausbau.

Für die Zukunft verbleiben einige grundlegende Fragen und Potenziale: Soll beispielsweise öffentlicher Mobilfunk nur als Rückfallebene für FRMCS dienen oder auch im Regelbetrieb eingesetzt werden – zumindest in wenig belasteten und gut versorgten Bereichen? Kann es gelingen, nach 2030 GSM-R in einem Atemzug mit der L2oS-Inbetriebnahme durch FRMCS zu ersetzen? Kann dieses dann zumindest zum Teil bei 900 MHz betrieben und somit Reichweiten erheblich vergrößert werden? Oder könnte es gar gelingen, ein wenig genutztes Rumpf-GSM-R (mit wenigen Frequenzkanälen) parallel zu einem schmalen FRMCS im 900-MHz-Band zu betreiben [21]? ■

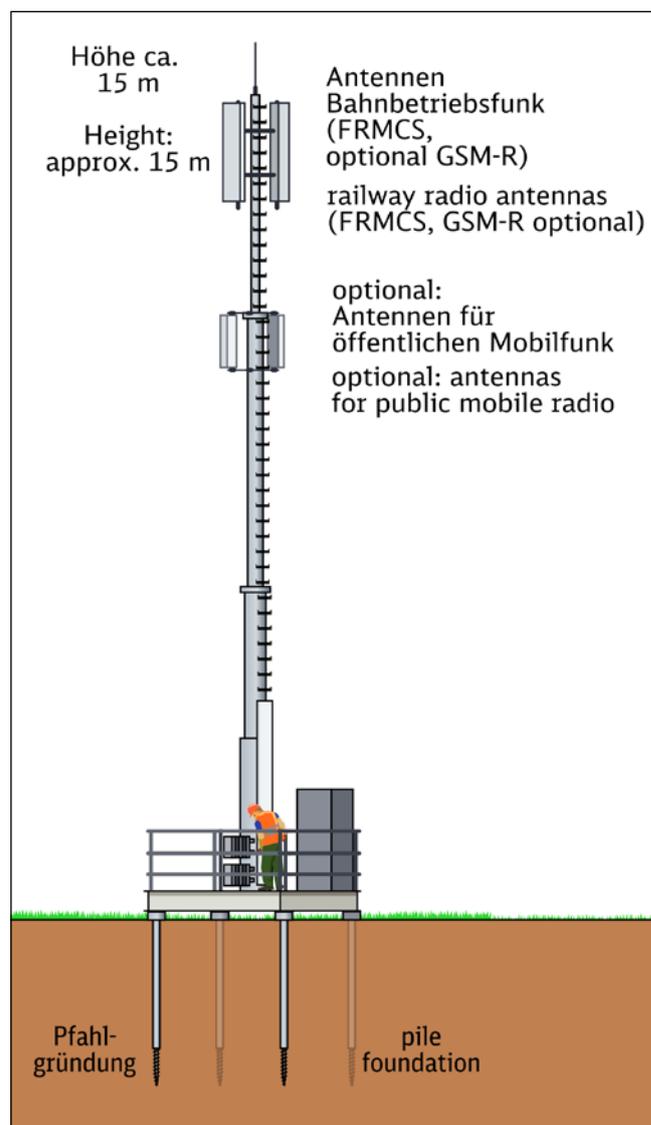


Bild 6: Standardisierter Mast

Fig. 6: Standardized mast

Quelle / Source: DB

range and thus creating an extended overlap again. During the transition period, which is expected to last from 2030 to 2035, rare operational restrictions in the event of faults will be tolerated. At the same time, this will save a mid double-digit million Euro amount.

As with the rest of the DB InfraGO network, only standardised masts (fig. 6) will be planned and built for new GSM-R-BTS and new radio sites for FRMCS. These are generally 15 metres high (20 metres in some cases), can usually be built without a lengthy federal approval procedure and can accommodate antennas for GSM-R, FRMCS and MNO.

Potential sites are currently being sought for this at a distance of one kilometre. This would also make it conceivable to equip them with Gigabit broadband 5G MNO (at 3.6/3.7 GHz), which would require a line of sight between the mast and the train. For FRMCS (at 1.9 GHz), distances of around 2 km are likely to be required, for GSM-R (at 900 MHz) around 4 km, although considerably shorter and longer distances are expected for topographical reasons. DB's mobile network planning department will select suitable sites from this pool. Mobile network planning for GSM-R has now begun. Mobile network planning for FRMCS is expected to follow from around 2026/2027 on the basis of the findings from MORANE 2 [21], when

LITERATUR | LITERATURE

- [1] Bitzer, F.; Dietrich, F.; Grell, A.; Lammerskitten, C.; Lück, B.; Schunke-Mau, C.; von Schaper, M.-L.; Vogel, T.; Wanstrath, S.: Sachstandsbericht Digitaler Knoten Stuttgart, DER EISENBAHNINGENIEUR 1/2025 (<https://bit.ly/40EhUg3>)
- [2] Kümmling, M.; Wanstrath, S.: „Digitale“ Kapazitätssteigerungen: ein Sachstand, Eisenbahn Ingenieur Kompendium 2024 (<https://bit.ly/4cHBOfi>)
- [3] Achilles, A.; Behrooz, A.; Beyer, M.; Lehmann, F.; Lies, R.; Schleede, M.; Trenschel, D.; Wanstrath, S.: Die Digitalisierung der S-Bahn-Stammstrecke Stuttgart (Teil 1), SIGNAL+DRAHT 9/2023 (<https://bit.ly/46AzFOF>)
- [4] Beyer, M.; Jurtz, S.; Langhof, M.; Reinhart, P.; Vogel, T.: ETCS als Trägersystem zur Leistungssteigerung bei der S-Bahn Stuttgart, SIGNAL+DRAHT 6/2019 (<https://bit.ly/2MJ4zAY>)
- [5] Ingenieurgemeinschaft Machbarkeitsstudie ETCS S-Bahn Stuttgart: Untersuchung zur Einführung von ETCS im Kernnetz der S-Bahn Stuttgart Ergebnisbericht vom 31. Januar 2019 (<https://bit.ly/2Yyaw6h>), S. 90-196
- [6] Bojic, M.; El-Hajj-Sleiman, H.; Flieger, M.; Lies, R.; Osburg, J.; Retzmann, M.; Vogel, T.: ETCS in großen Bahnhöfen am Beispiel des Stuttgarter Hauptbahnhofs, SIGNAL+DRAHT 4/2021 (<https://bit.ly/3fiozoJ>)
- [7] Dietrich, F.; Molterer, L.; Philippsen, F.; Reinhart, P.; Schunke-Mau, C.; Vogel, T.; Wester-Ebbinghaus, H.: Förderung der DSD-Fahrzeugausrüstung im Digitalen Knoten Stuttgart, DER EISENBAHNINGENIEUR 4/2023 (<https://bit.ly/3N24h5o>)
- [8] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur: Bekanntmachung der Richtlinie zur Förderung der Ausrüstung von Schienenfahrzeugen mit Komponenten des Europäischen Zugsicherungssystems ERTMS (...) im Rahmen der infrastrukturseitigen Einführung von ERTMS im „Digitalen Knoten Stuttgart“. Bundesanzeiger, BAnz AT 05.02.2021 B2 (<https://bit.ly/3hX5CJx>)
- [9] Flöter, C.; Raichle, F.; Höhne, T.; Köstlbacher, J.; Sane, N.; Sauer, M.; Schlichting, J.; Wagner, P.: Innovationskooperation Fahrzeugausrüstung im Digitalen Knoten Stuttgart, SIGNAL+DRAHT 9/2022 (<https://bit.ly/3dxD0Z6>)
- [10] Dietrich, F.; Meyer, M.; Neuhäuser, R.; Rohr, F.; Vogel, T.; Wenkel, W.: Fahrzeugnachschrüstung für den Digitalen Knoten Stuttgart, DER EISENBAHNINGENIEUR 9/2021 (<https://bit.ly/3tFQWUB>)
- [11] Dietrich, F.; Erdmann, J.; Jost, M.; Raichle, F.; Sane, N.; Vogel, T.; Wagner, P.: Nachrüstung von 333 Triebzügen für den Digitalen Knoten Stuttgart, ZEVrail 5/2022 (<https://bit.ly/3DHZIOS>)
- [12] Chavalier, D.; Flöter, C.; Gonzalez-Isabel, J.; Kampschulte, B.; Raichle, F.; Fritzsche, R.; Sane, N.; Wagner, P.: FRMCS-Ausrüstung von 463 Triebzügen für den Digitalen Knoten Stuttgart, SIGNAL+DRAHT 5/2023 (<https://bit.ly/3C5ZetG>)
- [13] Dietrich, F.; Pätzold, J.; Schiller, F.; Schunke-Mau, C.; Reinhart, P.: Die Umrüstung von S-Bahn-Triebzügen für den Digitalen Knoten Stuttgart, Eisenbahn-Revue International 3/2025 und 4/2025
- [14] Eckhardt, M.; Glaß, T.; Vogel, T.: Erfahrungen mit der Digitalen Schiene Deutschland in Baden-Württemberg, DER EISENBAHNINGENIEUR 6/2024 (<https://bit.ly/4cQKLT3>)
- [15] Drescher, O.: ETCS Level 2 ohne „Signale“ in einem großen Knoten, Deine Bahn 3/2022 (<https://bit.ly/3O4n5i1>)
- [16] National Values T_NVCONTACT (40 s) und M_NVCONTACT (1) in: Übersicht der nationalen Werte für ETCS auf den Strecken der DB Netz AG, Brief vom 27. Januar 2022 (<https://bit.ly/3DnMkvz>)
- [17] Behrens, M.; Eschbach, A.; Kampschulte, B.; Paltian, A.; Schöppach, M.; Wiedenroth, A.: Robuste Leit- und Sicherungstechnik im Digitalen Knoten Stuttgart, DER EISENBAHNINGENIEUR 11/2022 (<https://bit.ly/3hiu0ZL>)
- [18] Barth, P.; Eftekhari, M.; El-Hajj-Sleimann, H.; Hoffmann, M. T.; Kümmling, M.; Retzmann, M.; Rohr, F.: ETCS auf der Schnellfahrstrecke Wendlingen – Ulm, SIGNAL+DRAHT 7+8/2023 (<https://bit.ly/3EJQMbo>)
- [19] Thude, U.: Erfahrungen aus der Realisierung des Digitalen Knotens Stuttgart. Beitrag zur 22. Tk-Fachtagung. Fulda, 7. Oktober 2024
- [20] DB-interne Richtlinien 819.1343 (mit Anlage „Anforderung des europäischen Zugsicherungssystems ETCS an GSM-R (...)\", 859.1202 und 859.2202
- [21] Holfeld, B.; Ruhrig, P.: MORANE-2: Der finale Validierungsschritt für FRMCS Edition 1, SIGNAL+DRAHT 5/2025
- [22] Karabinos, T.; Holfeld, B.; Fritzsche, R.; Alte, N.; Taferner, M.; Basha, S. Z.; Moessner, K.; Chkeri, N.: 5G-RACOM – Feldstudie zu hybriden FRMCS-Netzen für ein resilientes Bahnfunksystem, SIGNAL+DRAHT 9/2024 (<https://bit.ly/3FfvM0>)

further foundations and experience from trials and pilot projects are available.

5 Summary and outlook

Not limited to the field of mobile networks, DKS shows that there is no alternative to jointly shaping and optimising the modernisation and digitalisation of the railways with a sense of proportion and striving for good solutions for the overall railway system. Thanks to the closely coordinated equipping of vehicles and infrastructure, GSM-R without GPRS in the core node has sufficient capacity for ETCS L2 only operation. In the periphery, the FRMCS equipment of many trains, which involves little additional effort, avoids a costly full-scale GSM-R expansion.

Some fundamental questions and potentials remain for the future: for example, should MNO only serve as a fallback level for FRMCS or should it also be used in regular operations – at least in less congested and well-covered areas? Is it possible to replace GSM-R with FRMCS after 2030 in the same breath when ETCS L2 is commissioned? Can FRMCS then be operated at least in part at 900 MHz and thus significantly increased ranges? Or could it even be possible to operate a little-used truncated GSM-R (with a few RF channels) in parallel with a narrow FRMCS in the 900 MHz band [22]? ■

AUTOREN | AUTHORS

Akhil Bhadran

Technisches Projektmanagement / *Technical Project Management*
Digitaler Knoten Stuttgart Baustein 3 / *Stuttgart Digital Node, building block 3*
DB Projekt Stuttgart-Ulm GmbH
Anschrift / *Address*: Stockholmer Platz 1, D-70173 Stuttgart
E-Mail: akhil.bhadran@deutschebahn.com

Jenny Dang

Plattformentwicklung und TK-Anforderungsmanagement / *Platform development and telecommunications requirements management*
DB InfraGO AG
Anschrift / *Address*: Adam-Riese-Straße 11-13, D-60327 Frankfurt a. Main
E-Mail: viet-hoai-diem-jenny.dang@deutschebahn.com

Marcel Eckhardt

Stellv. Leiter Projektgruppe „Digitale Schiene“ / *Deputy Head of Project Group „Digital Rail“*
Ministerium für Verkehr Baden-Württemberg
Anschrift / *Address*: Dorotheenstraße 8, D-70173 Stuttgart
E-Mail: marcel.eckhardt@vm.bwl.de

Fabian Raichle

Experte ETCS, ATO, FRMCS / *ETCS, ATO & FRMCS Expert*
Programm S-Bahn 2025
DB Regio AG
Anschrift / *Address*: Eisenbahnstraße 42, D-73207 Plochingen
E-Mail: fabian.raichle@deutschebahn.com

Peter Reinhart

Programmleitung Knoten Stuttgart / *Program Management Stuttgart Node*
DB InfraGO AG
Anschrift / *Address*: Stockholmer Platz 1, D-70173 Stuttgart
E-Mail: peter.reinhart@deutschebahn.com

Ulrich Thude

Technisches Projektmanagement GSM-R / *DKS / Technical Project Management GSM-R / DKS*
DB Projekt Stuttgart-Ulm GmbH
Anschrift / *Address*: Stockholmer Platz 1, D-70173 Stuttgart
E-Mail: ulrich.thude@deutschebahn.com