



Vortrag im Bahnsystemkolloquium der TU Dresden

Funk im Digitalen Knoten Stuttgart: Erfahrungen mit GSM-R, FRMCS und Co.

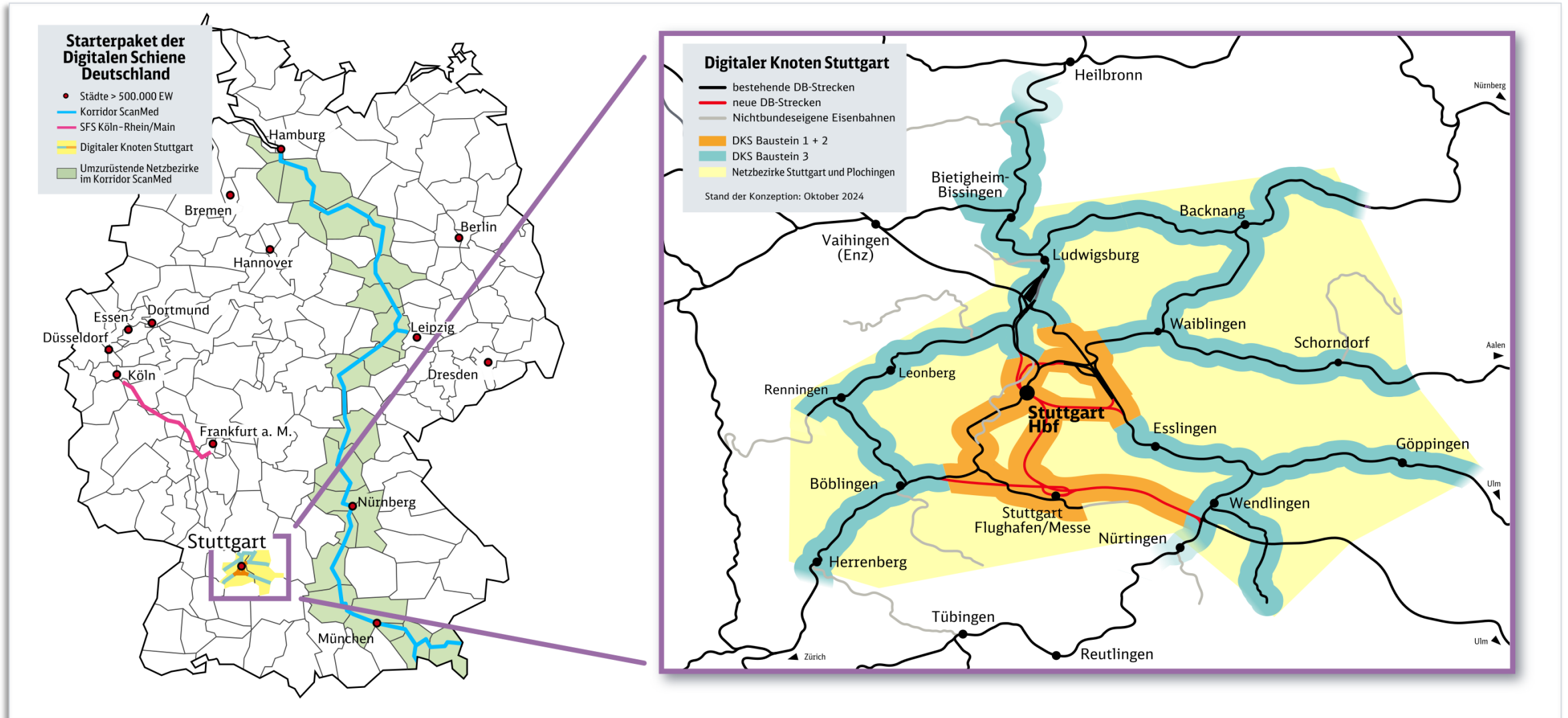
DB Projekt Stuttgart-Ulm GmbH / DB InfraGO AG | I.GVE / I.ITL 8 | Ulrich Thude / Peter Reinhart | Dresden | 23.10.2025

Titelbild: GSM-R-Standort im Fildertunnel im September 2024 (Foto: Ulrich Thude)
Dieser Foliensatz wird auf <https://tu-dresden.de/bu/verkehr/ibv/studium/bkk-ws> veröffentlicht.
Alle Abbildungen ohne Quellenangabe im Foliensatz: Deutsche Bahn

1. GSM-R: Grundlagen und Konzeption im Kernknoten
2. Schnittstellen zwischen GSM-R und Rohbau
3. Ausblick: FRMCS und Komplexität

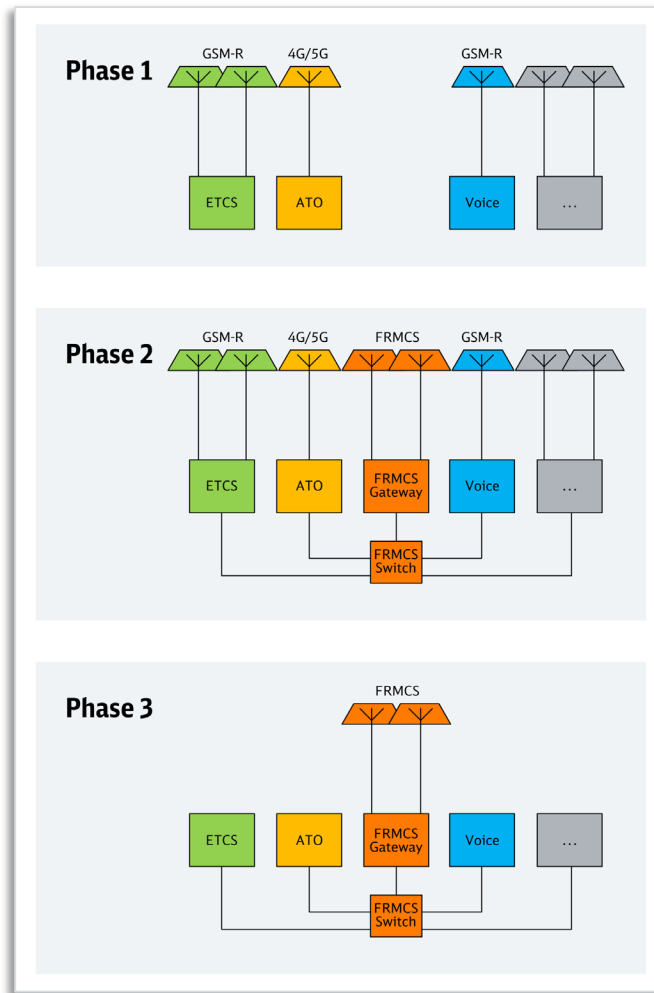
- 1. GSM-R: Grundlagen und Konzeption im Kernknoten**
2. Schnittstellen zwischen GSM-R und Rohbau
3. Ausblick: FRMCS und Komplexität

Der Digitale Knoten Stuttgart (DKS) umfasst rund 500 Streckenkilometer und geht weit über Stuttgart 21 hinaus.



Vertiefend: Sachstand Digitaler Knoten Stuttgart. Der Eisenbahningenieur 1/2025 (<https://bit.ly/40EhUg3>).

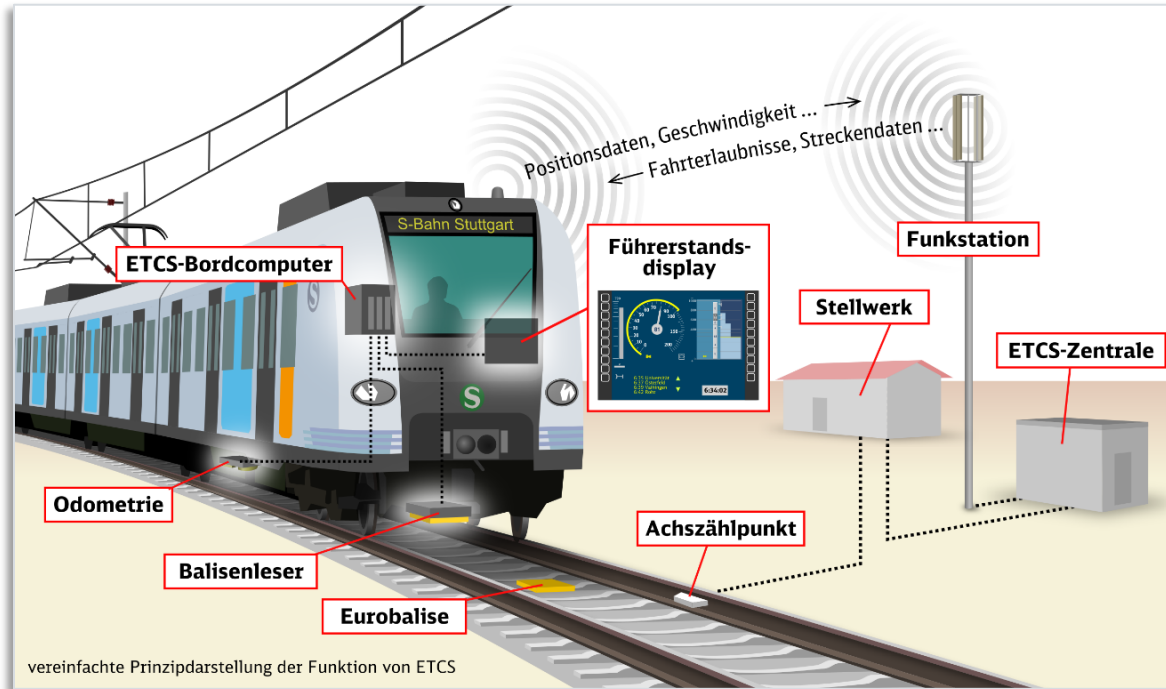
Im Rahmen des DKS werden mehr als 500 Triebzüge u. a. mit GSM-R, FRMCS und öffentlichem Mobilfunk (für ATO GoA 2) ausgerüstet.



Links: Phasen der Funk-Migration auf den Fahrzeugen. Rechts: aufgeständerte FRMCS-Antennen auf Triebzug der Baureihe 430 (links vorne und hinten) sowie für öffentlichen Mobilfunk (rechts mittig). (Foto: Alstom)

Vertiefend: *FRMCS-Ausrüstung von 463 Triebzügen für den Digitalen Knoten Stuttgart*. Signal+Draht 5/2023 (<https://bit.ly/3C5ZetG>), *Die Umrüstung von S-Bahn-Triebzügen für den Digitalen Knoten Stuttgart*. Eisenbahn-Revue International 3/2025 (<https://bit.ly/3HlofqI>) und 4/2025 (<https://bit.ly/4kiJNly>) sowie *Mobilfunk im Digitalen Knoten Stuttgart*. Signal+Draht 5/2025 (<https://bit.ly/40jcqYL>).

Zur Erinnerung: In ETCS Level 2 kommunizieren Fahrzeug und Infrastruktur per Funk.



ETCS Level 2 erfordert ein hochwertiges Funkfeld im Hinblick auf:

- Feldstärke (ausreichender Pegel)
- Kapazität (ausreichende Anzahl von Funkverbindungen)
- Qualität (wenige Störungen/Unterbrechungen)
- Verfügbarkeit (wenige Ausfälle)

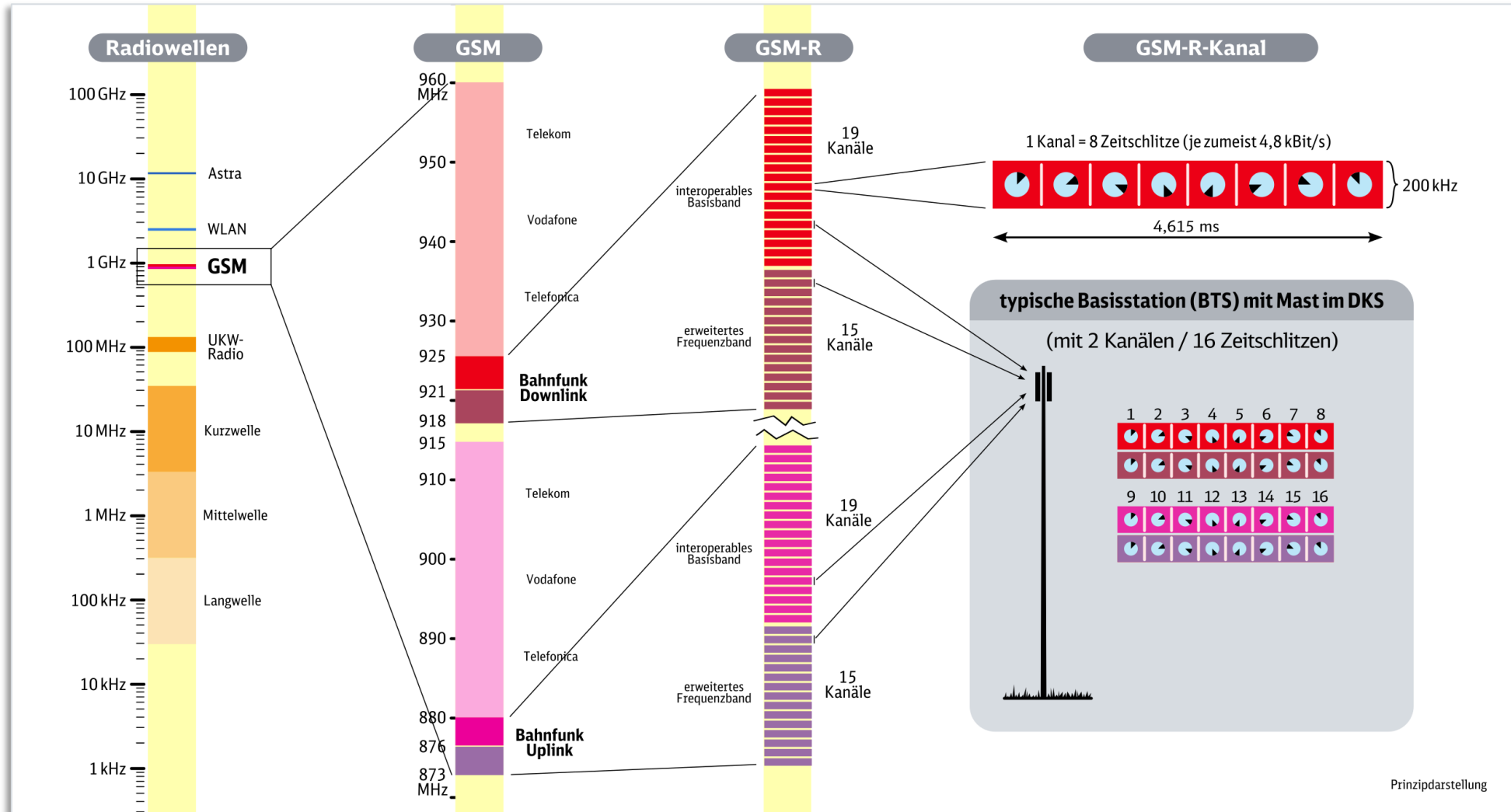
GSM-R erweitert den alten GSM-Standard um bahnspezifische Funktionen. Beide stehen weltweit vor der Ablösung.



- GSM-R basiert auf GSM, das 1990 spezifiziert wurde.
- GSM-R wurde im Jahr 2000 spezifiziert und ist seit 2002 in Deutschland im Einsatz.
- GSM-R erweitert GSM um bahnspezifische Funktionen, z. B. Not- und Gruppenruf sowie Priorisierung.
- Im Vergleich zu folgenden Mobilfunkgenerationen (3G/UMTS, 4G/LTE, 5G) ist GSM sehr ineffizient und unflexibel.
- GSM ist national und weltweit eine „sterbende“ Technik. Die Deutsche Telekom und Vodafone haben angekündigt, es 2028 in Deutschland abzuschalten.
- GSM-R soll im DB-Netz 2035 abgeschaltet werden.
- Wir stehen somit vor der Herausforderung, in den kommenden Jahren ein komplett neues Netz aufzubauen und dabei mehrere Mobilfunkgenerationen zu überspringen.

Linkes Bild: Das von 1992 bis 1994 gefertigte Nokia 1011 (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Nokia_1011_museum.jpg, CC-BY-4.0-Lizenz, Urheber: „Materialscentist“). Rechtes Bild: GSM-R-Handy OPH-810R (Foto Thude). Vertiefend: https://de.wikipedia.org/wiki/Global_System_for_Mobile_Communications und <https://de.wikipedia.org/wiki/GSM-R>

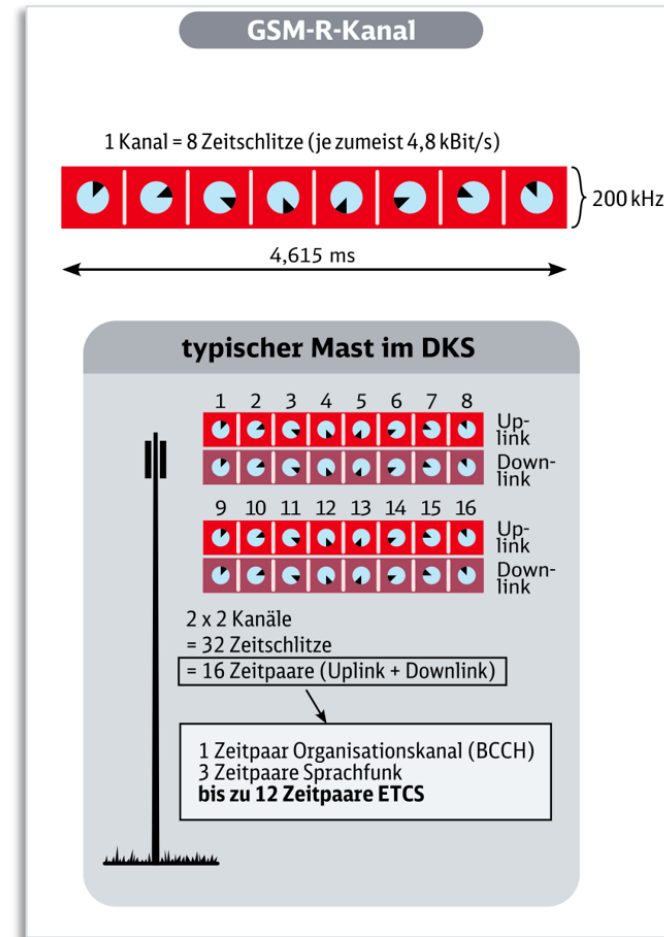
Funkkanalkapazität: In Deutschland stehen für GSM-R 34 Frequenzpaare (Kanäle) mit jeweils acht Zeitschlitzten zur Verfügung.



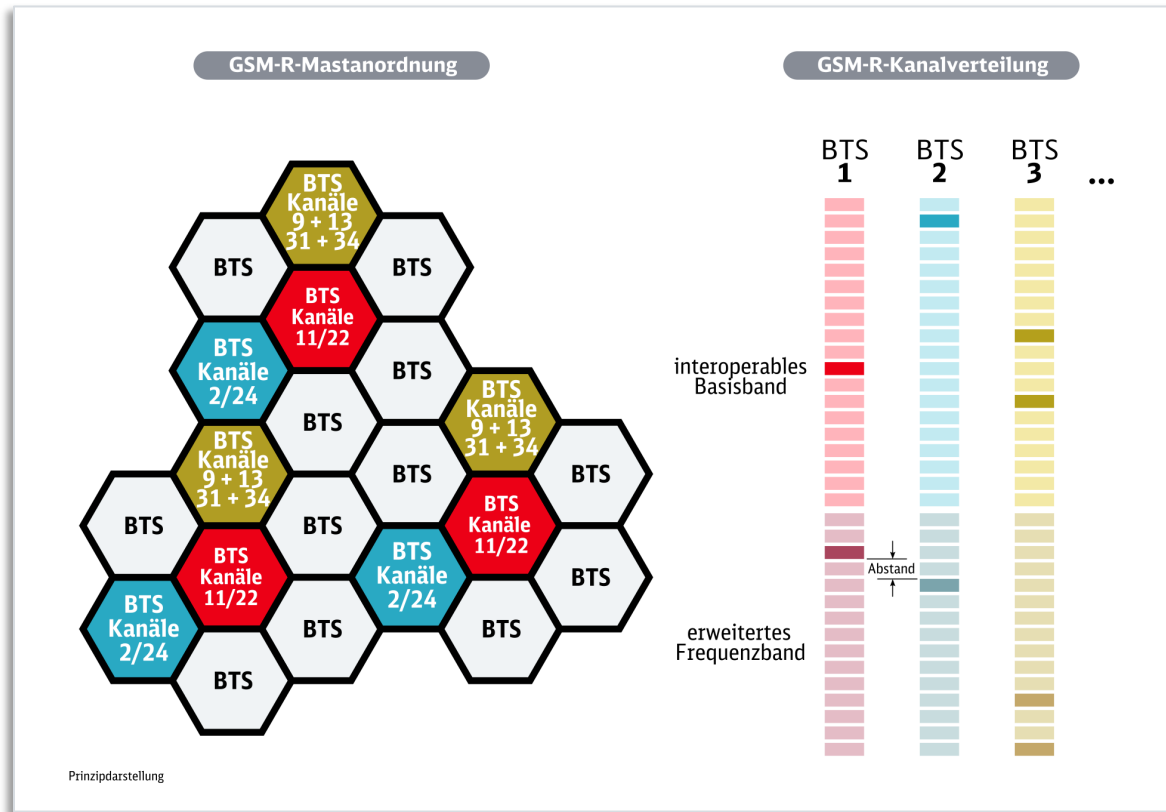
Vertiefend: <https://de.wikipedia.org/wiki/GSM-R> (u. a. „erweitertes Band“) und https://de.wikipedia.org/wiki/Global_System_for_Mobile_Communications

Eine Basisstation (BTS) im DKS kann ungefähr 12 bis 25 Züge parallel in ETCS führen.

- Auf Basisstationen (BTS) im DKS werden in der Regel jeweils 2 bis 4 Kanäle im Up- und Downlink aufgeschaltet.
- Damit stehen in beiden Richtungen jeweils 16 bis 32 Zeitschlitzte zur Verfügung (Abbildung).
- 1 bis 2 Zeitschlitzte dienen als Organisationskanal (BCCH), beispielsweise, um eine Funkverbindung aufzubauen.
- Ein Teil der Kapazität wird für Sprachfunk vorgesehen.
- Die übrige Kapazität steht für andere Anwendungen zur Verfügung, insbesondere ETCS.
- Da ETCS höher als Sprachfunk priorisiert ist, würde eine mit ETCS-Verbindungen „volllaufende“ BTS laufende Telefonate verdrängen.
- Maßgebend für die Kapazitätsbemessung sind daher Störfallszenarien mit „Staus“ von ETCS-Zügen und gleichzeitig viel Sprachkommunikation.

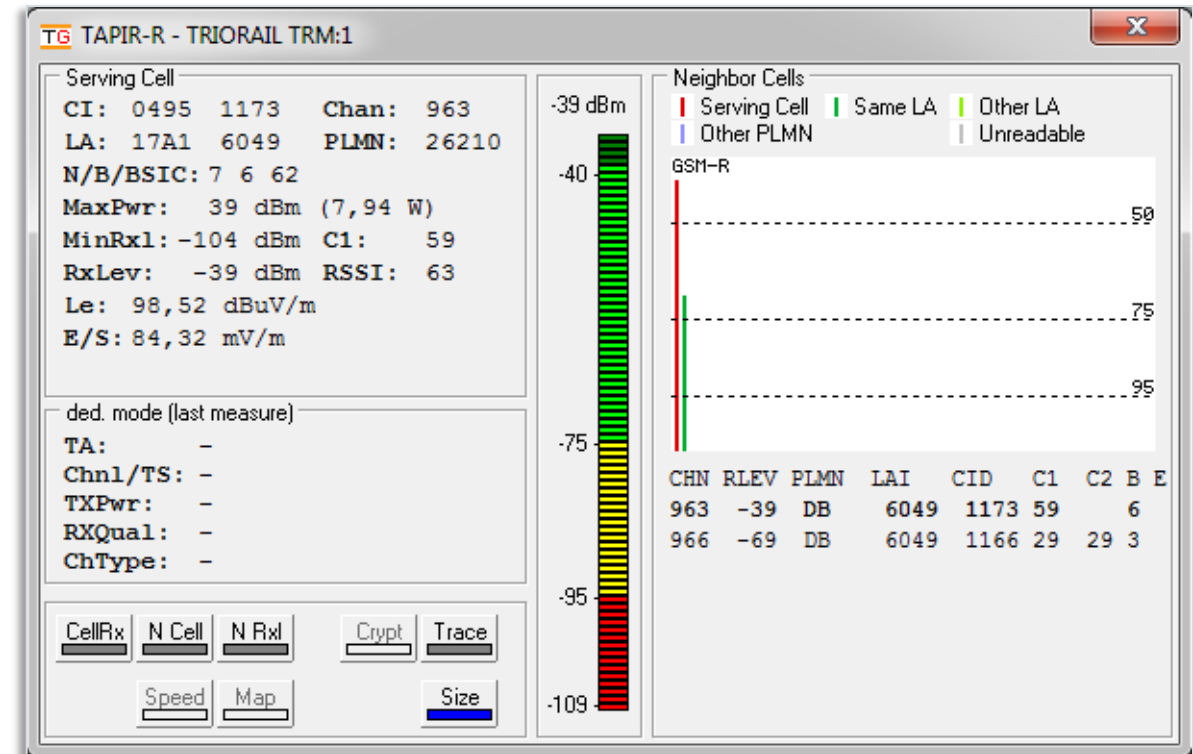
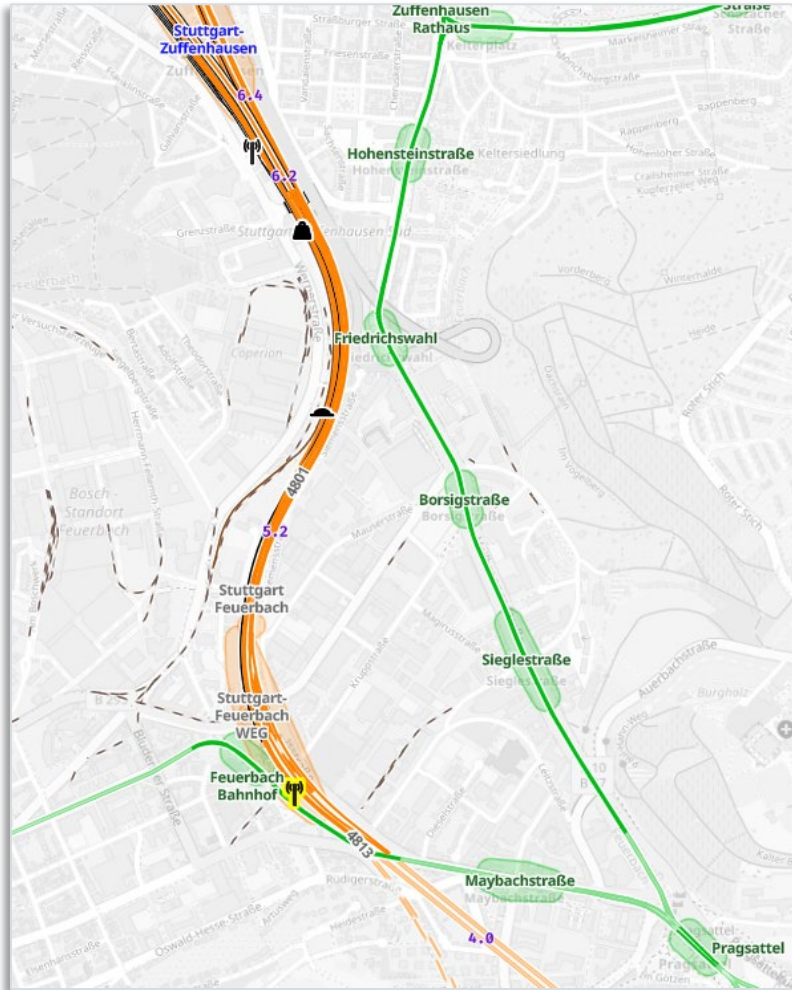


Wesentliche Randbedingungen der Frequenzplanung an einem einfachen Beispiel.



- In einer idealen Welt (Abbildung) sind die Versorgungsbereiche von BTS klar umgrenzt und gleichförmig.
- Die Ränder werden von mindestens zwei BTS versorgt, um einen nahtlosen Handover zu gewährleisten.
- Die auf einer BTS aufgeschalteten Kanäle können frühestens ab der übernächsten Zelle wiederverwendet werden (Abbildung), um gegenseitige Beeinflussungen und Störungen zu vermeiden.
- Auch innerhalb einer BTS sollten Abstände zwischen den Kanälen eingehalten werden.
- Auf jeder BTS muss mindestens ein Kanal des Basisbandes aufgeschaltet werden (Interoperabilität).

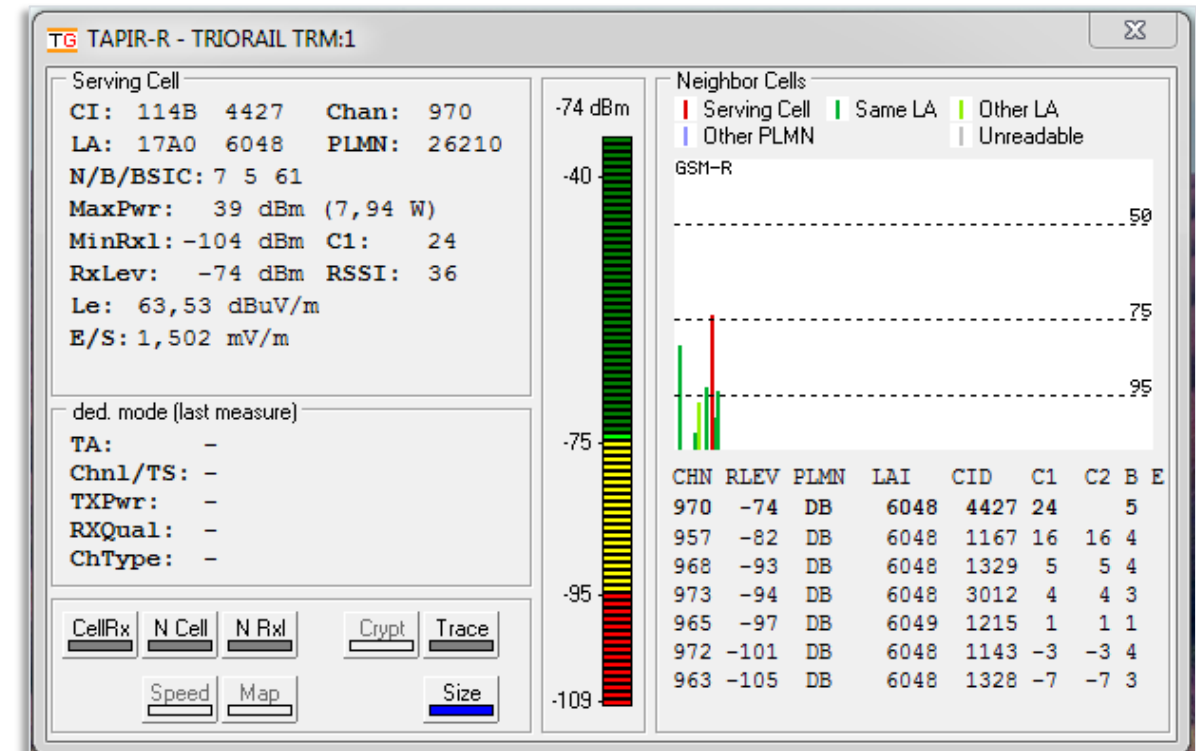
Funknetzplanung am Beispiel: Ideale, klare Verhältnisse – am Bahnsteig in Stuttgart-Feuerbach



Linke Abbildung: Screenshot aus OpenRailwayMap (www.openrailwaymap.app) mit hervorgehobener Basisstation (BTS) Feuerbach. (Kartendaten: OpenStreetMap-Mitwirkende)

Rechte Abbildung: Screenshot aus eigener Messung am Bahnsteig in Feuerbach (von 2017): Empfangen wurde die benachbarte Basisstation (-39 dBm, links in gelb) sowie eine nahe gelegene Basisstation (-69 dBm).

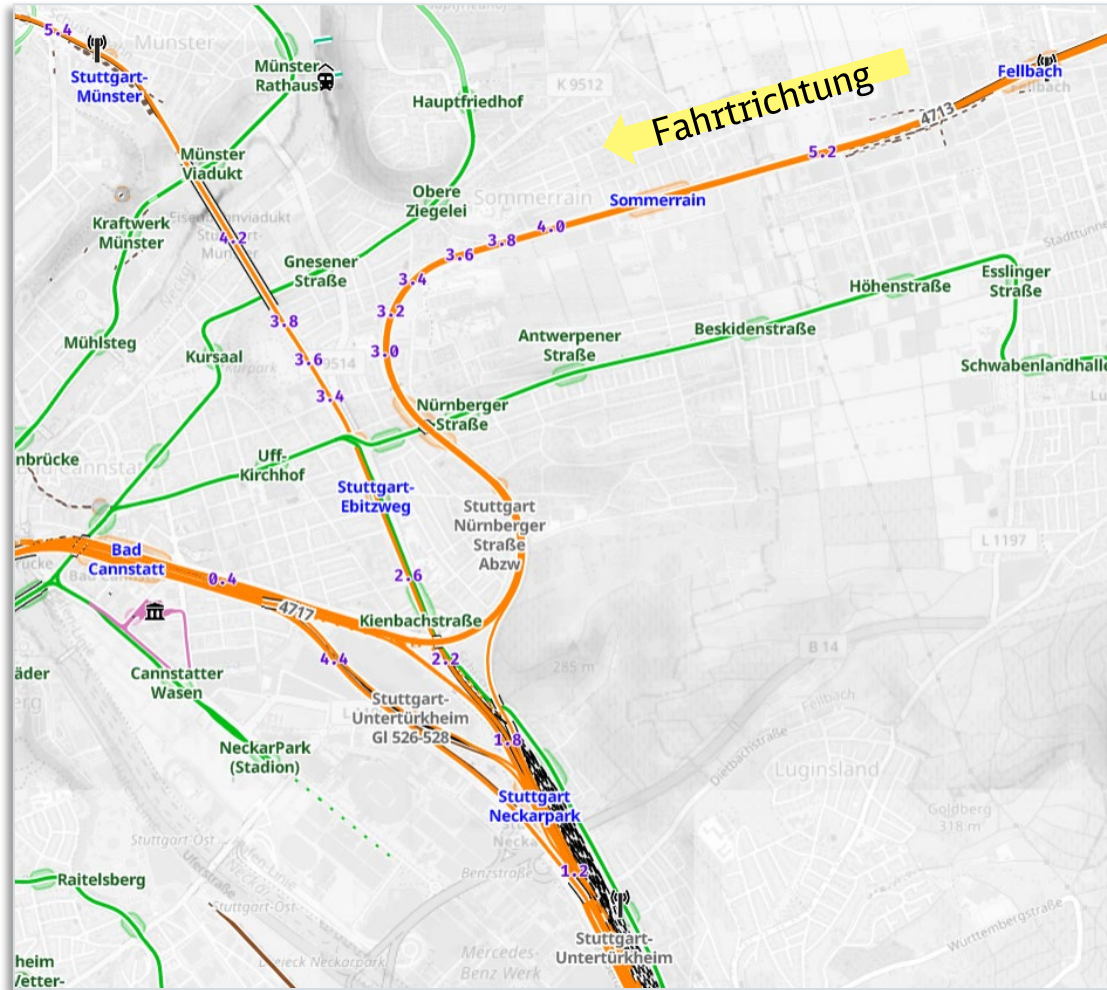
Funknetzplanung am Beispiel: Heterogene Funkversorgung im Bahnhof Bad Cannstatt



Linke Abbildung: Screenshot aus OpenStreetMap (<https://overpass-turbo.eu/s/2dAw>). Gelb-blau markiert sind GSM-R-Basisstationen. (Kartendaten: Openstreetmap-Mitwirkende)

Rechte Abbildung: Screenshot aus eigener Messung (im Bahnhof Bad Cannstatt, von 2017): Empfangen werden sieben Basisstationen, darunter vier mit einem für GSM-R ausreichenden Pegel („RLEV“, wenigstens -95 dBm).

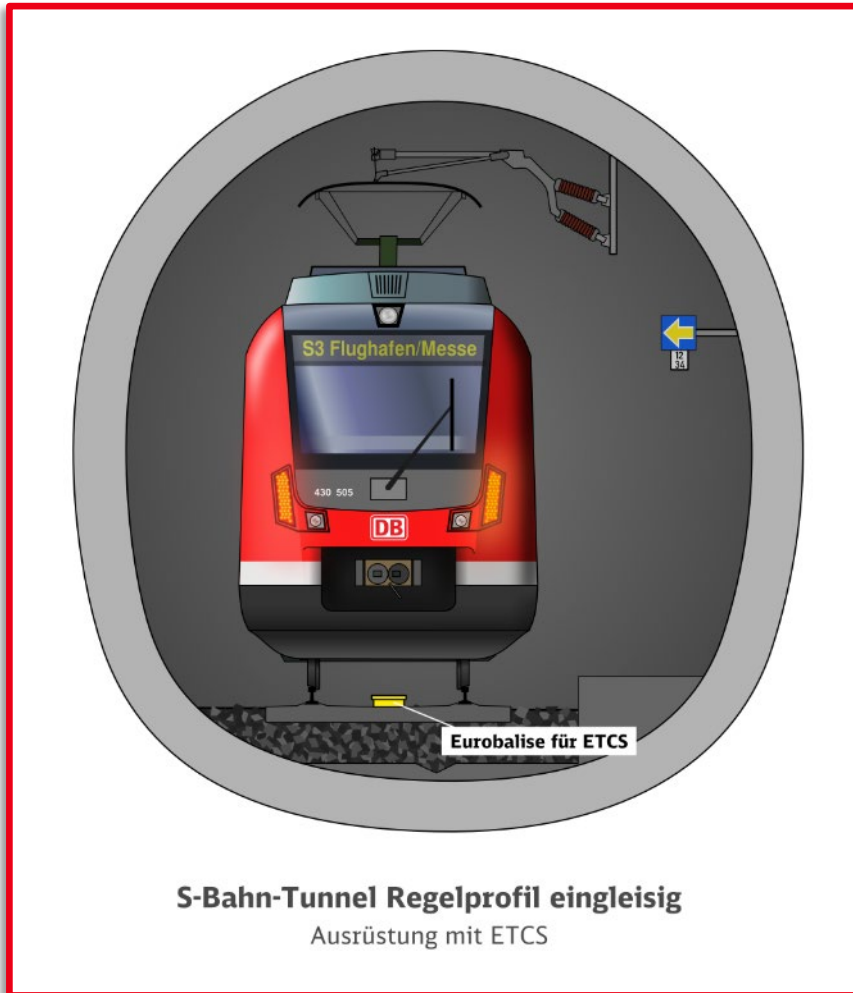
Ein Beispiel für Wechselwirkungen zwischen Funk und LST: Ausdehnung des ETCS- und Stellbereichs bei Sommerrain



- Der ETCS-Einstieg im nordöstlichen Zulauf war zunächst an der bisherigen Stellwerksgrenze im Bereich Nürnberger Straße (Bildmitte) geplant, mit einem Funkaufbau bei Sommerrain (Pfeil).
- Der Bereich ist topographisch anspruchsvoll (S-Bogen, Hanglage). Messfahrten zeigten „Ping-Pong-Handover“ zwischen mehreren BTS.
- Erfahrungen aus der VDE 8 zeigten klar, dass bestimmte Züge empfindlich auf BTS-Handover im ETCS-Einstiegsbereich reagier(t)en.
- Daher wurde der ETCS-Bereich (und somit der Stellbereich) bis Sommerrain ausgeweitet.
- Funkaufbau und Einstieg erfolgen damit durchweg in der Geraden im Versorgungsbereich der BTS Fellbach (rechts oben).

Abbildung: <https://openrailwaymap.app/#view=13/48.80294/9.24089> (mit aktivem Hillshade, Kartendaten: OpenStreetMap-Beitragende)
Vertiefend: Robuste Leit- und Sicherungstechnik im Digitalen Knoten Stuttgart. Der Eisenbahningenieur 11/2022 (<https://bit.ly/460gNtY>).

Wir haben uns im DKS ganz bewusst entschieden, auf eine Doppelausrüstung zu verzichten – mit allen daraus folgenden Themen.



S-Bahn-Tunnel Regelprofil eingleisig
Ausrüstung mit ETCS

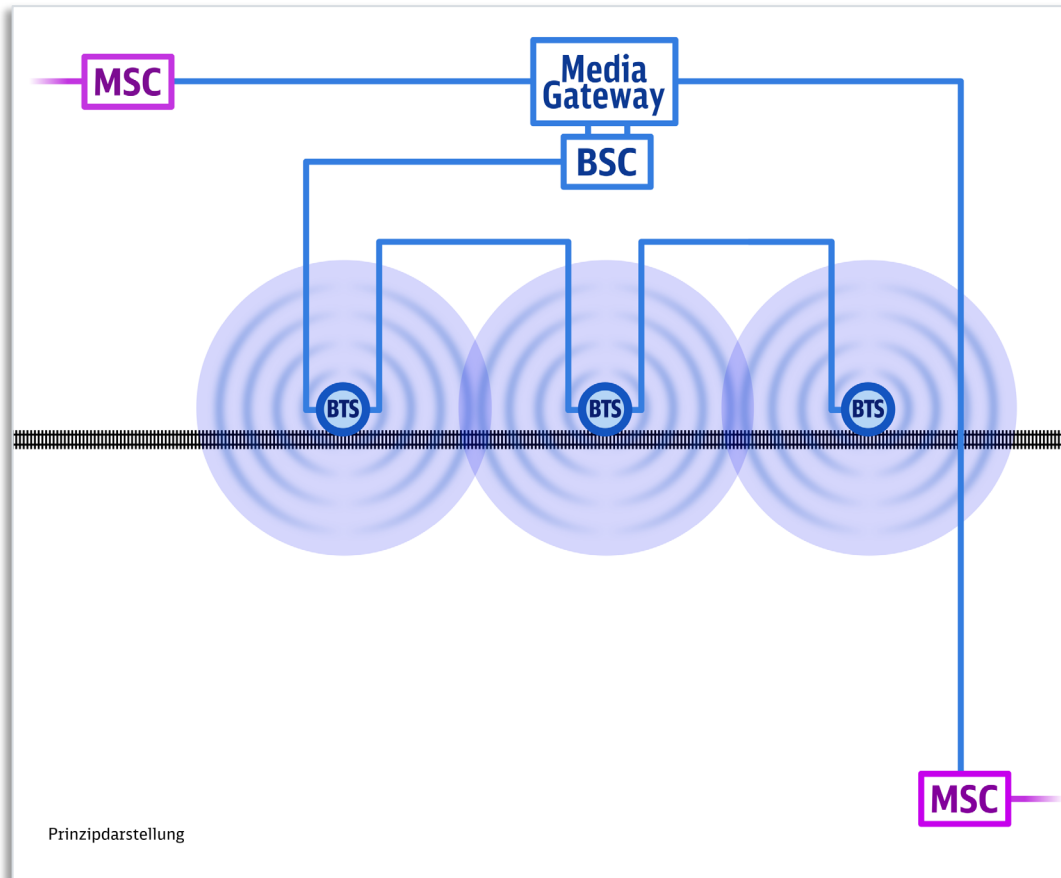


S-Bahn-Tunnel Regelprofil eingleisig
Ausrüstung mit punktförmiger Zugbeeinflussung (PZB) und ETCS

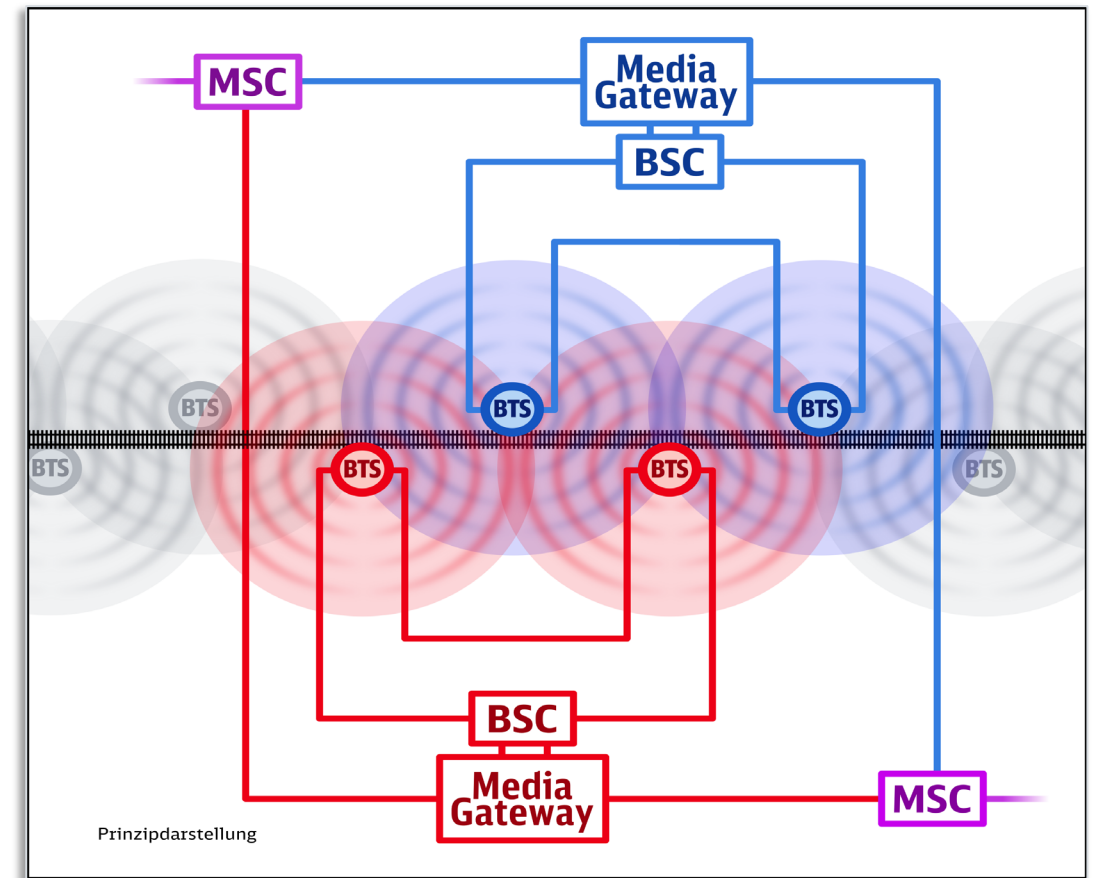
links: reine ETCS-Ausrüstung (Eurobalise und „Blechtefel“)
rechts: zusätzliche Ausrüstung mit konventionellen Lichtsignalen und zugehöriger Punktförmiger Zugbeeinflussung (PZB)
Vertiefend: *ETCS Level 2 ohne „Signale“ in einem großen Knoten*. Deine Bahn 3/2022 (<https://bit.ly/3S4NBdj>).

Im Kern des DKS entsteht GSM-R in einer besonders robusten Ausprägung.

Ausgangssituation (für Sprachfunk):
BTS in Kettenanbindung



Ziel: überlappende Funkversorgung mit
alternierender BTS-BSC-Anbindung, in Loops.



BTS: Base Transceiver Station (Basisstation), BSC: Base Station Controller (übergeordnetes Netzelement); MSC: Mobile Services Switching Centre

Linke Abbildung: Typische Anbindung von BTS (in Ketten) für Sprachfunk (ohne ETCS). Rechte Abbildung: Konzept mit verdichteten BTS und alternierender BTS-BSC-Anbindung (für Bausteine 1 und 2).

Vertiefend: Mobilfunk im Digitalen Knoten Stuttgart. Signal+Draht 5/2025 (<http://bit.ly/40jcqYL>).

DB Projekt Stuttgart-Ulm GmbH / DB InfraGO AG | I.GVE / I.ITL 8 | Dresden | 23.10.2025

1. GSM-R: Grundlagen und Konzeption im Kernknoten
2. **Schnittstellen zwischen GSM-R und Rohbau**
3. Ausblick: FRMCS und Komplexität

Gedanken zur Eröffnung

Eine Betrachtung Schnittstellen von GSM-R/FRMCS zur Infrastruktur



Wirtschafts-Nobelpreis 2025: Joel Mokyr, Philipp Aghion, Peter Howitt

Joel Mokyr von der Northwestern University, Philippe Aghion vom Collège de France und Peter Howitt von der Brown University erforschen, wie Innovation und Wissen gesellschaftlichen Wohlstand fördern. Ihre Arbeiten haben gezeigt, **wie technischer Fortschritt und Wettbewerb Wirtschaftswachstum antreiben.**

Auszeichnung für: Ihre Forschung zur Rolle von Innovation und „creative destruction“ in wirtschaftlichem Wachstum. Mokyr analysierte die Bedingungen für **nachhaltiges Wachstum durch technologischen Fortschritt**; Aghion & Howitt entwickelten Modelle, die den Einfluss von Wettbewerb und technologischer Neuerung auf ökonomische Entwicklung erklären.

19.-Jahrhundert-Experten warnen:

Menschen werden Schaden nehmen, wenn sie mit der Eisenbahn schneller als 30 km/h fahren, das war die Geschwindigkeit eines galoppierenden Pferdes.

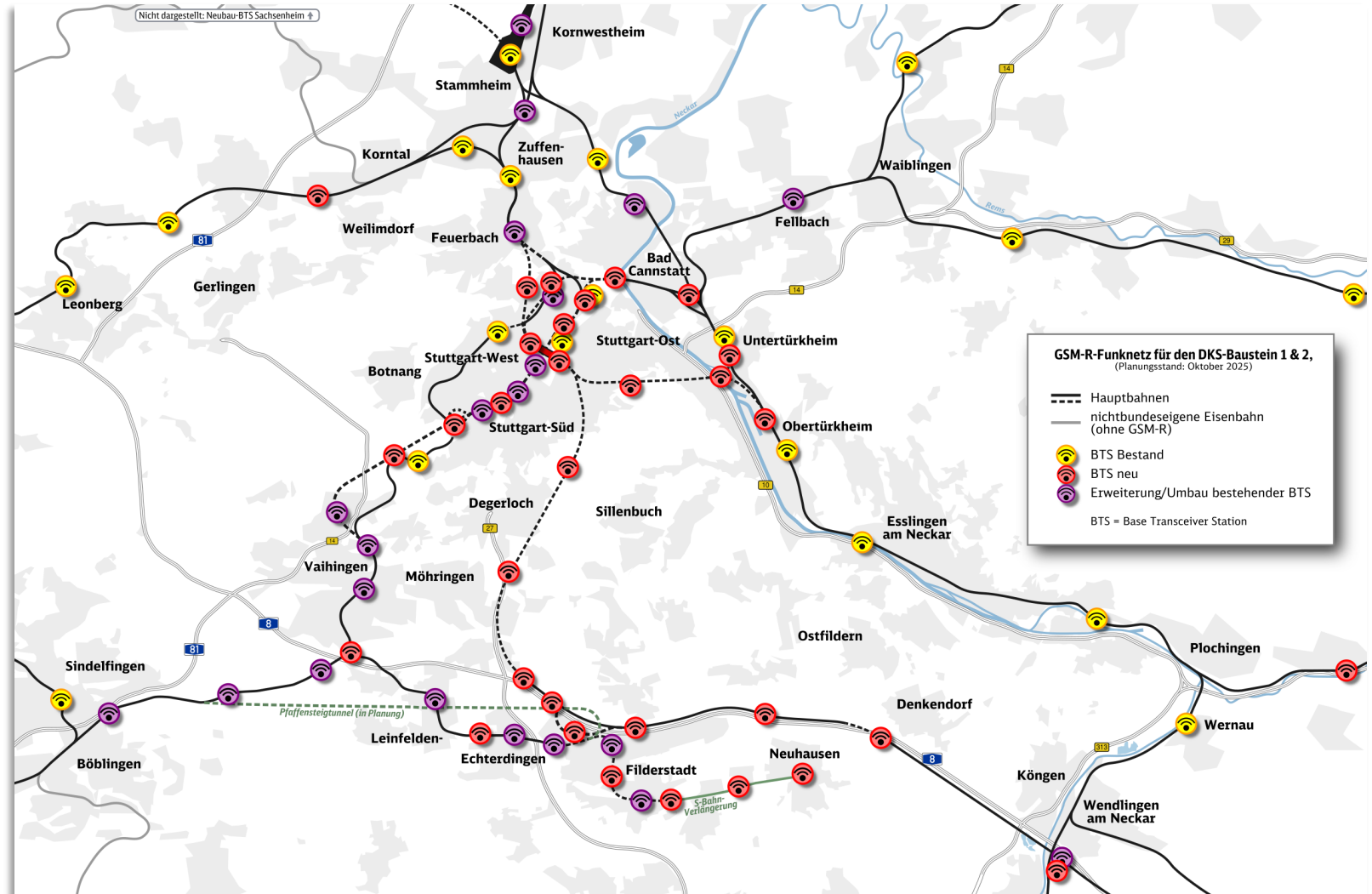
Die Folge einer Überschreitung wäre eine Gehirnerkrankung, genannt „Delirium Furiosum“.

Wer nicht mit der Zeit geht, geht mit der Zeit.

Für den rund 125 Strecken-km umfassenden Kernbereich des DKS sind bis 2027 mehr als 50 GSM-R-BTS zu bauen und anzupassen.



- Rund 125 Streckenkilometer werden mit ETCS ausgerüstet, darunter
 - die gesamte Stuttgart-21-Infrastruktur (für ca. 700 Züge/Tag)
 - die hochbelastete S-Bahn-Stammstrecke (fast 1000 Züge/Tag)
 - Teile umliegender Bestandsstrecken
- Im Kernbereich des Knotens wird ein besonders robustes und hochwertiges Funkfeld geschaffen. Der Ausfall einer BTS oder einer BSC soll ohne Auswirkungen auf den laufenden Betrieb bleiben.
- Dafür entstehen rund 30 neue BTS (rot), mehr als 20 BTS werden angepasst (lila).



Derzeit im Abnahmeprozess: Der Streckenbereich der Strecke 4813 von Stuttgart Hbf nach Wendlingen.



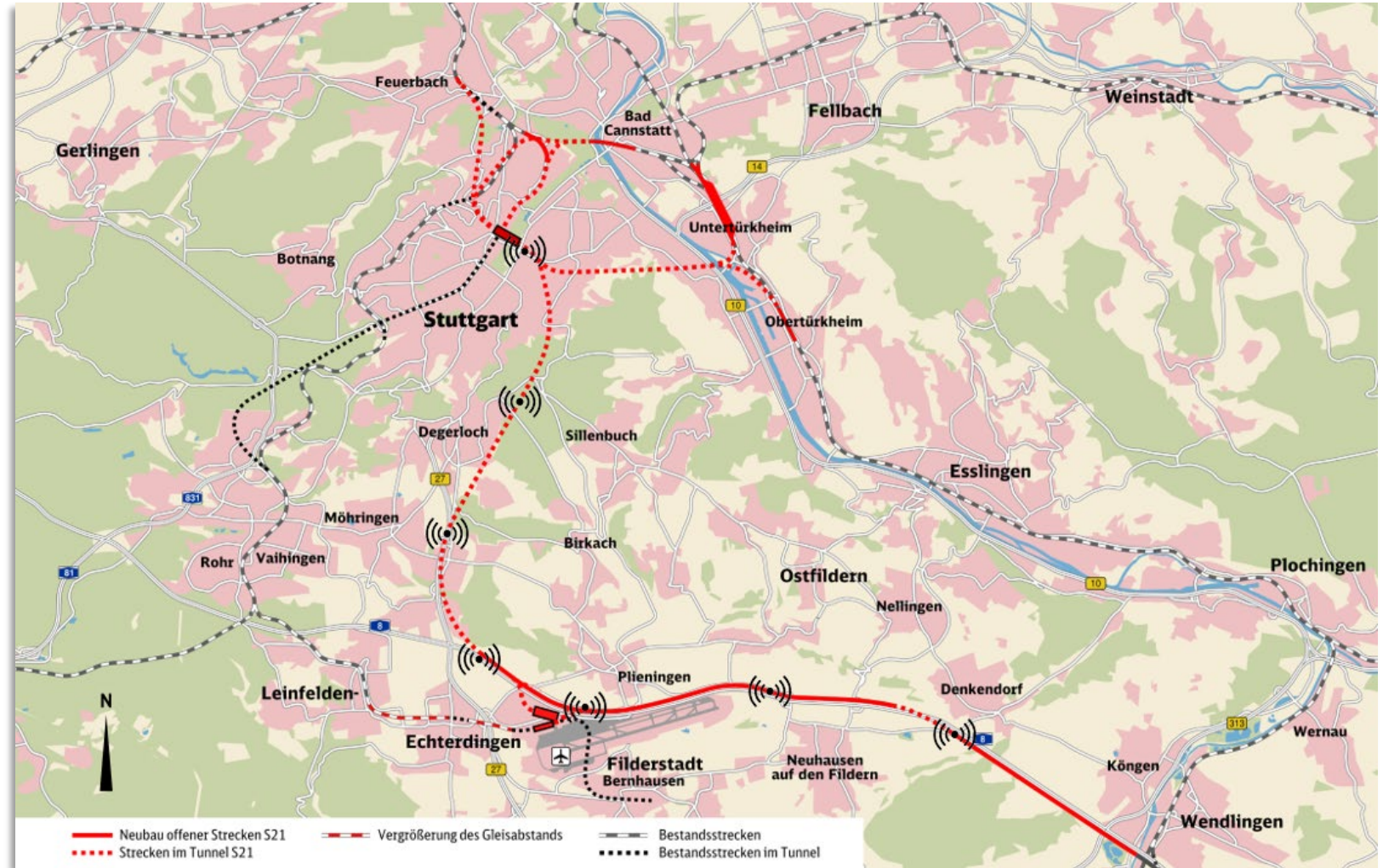
Auf einer Strecke von 26 km wurden in den letzten 24 Monaten 7 BTS-Neubauten verwirklicht (Abbildung).

Von den BTS-Standorten sind:

- 3 im Tunnel (in Technikräumen)
- 3 mit Betonschaltheus im Freifeld mit
 - Antennen am Mast des öffentlichen Mobilfunks
 - Antennen im Tunnel
- ein reiner GSM-R-Standort mit Outdoor-BTS und eigenem Mast mit Flughindernisbefeuern

Ablauf:

- Team gebildet im Juni 2023.
- Beginn der Ausführungsplanung im November 2023.
- Externe Planer und Bauüberwachung wurden gebunden.
- Alle sieben BTS sind inzwischen abgenommen und Abnahme-Messzugfahrten sind derzeit im November 2025 geplant.
- Derzeit warten wir auf die Abnahme LWL & Stromversorgung



Das Besondere im Kernknotenbereich: überlappende (verkammte) Funkversorgung

Prinzip der GSM-R- Anbindung

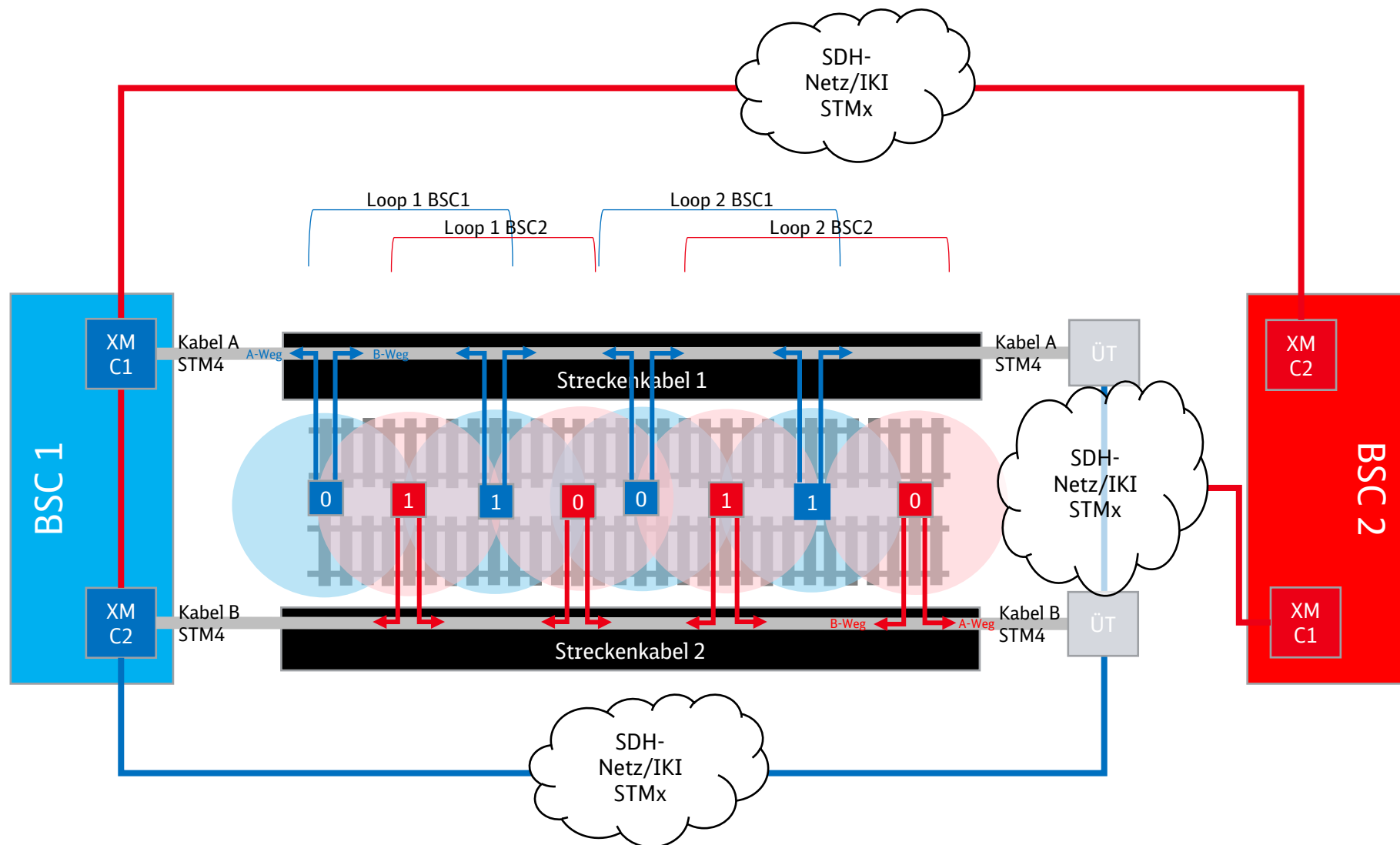
Mit verbesserter Resilienz, 3
Havarie-Punkte.

Unterschiedliche Strecken-
Kabel je BSC
(1 Stichkabel notwendig)

Entscheidend ist die geo-
redundante Anbindung jeder
BTS!

Nur ein Übertragungssystem
(STM4) auf jedem Kabel für
GSM-R

Loopschaltung wird durch
Systemtechnik gesteuert.



Die Werkzeugkiste zur Planung & Bau von GSM-R / FRMCS



- Systemtechnik
 - Outdoorschränke
 - Betonschaltheus (alle DB-Technik im großen / kleinen BSH)
 - Technikräume
- Systemanbieter
 - Huawei im Norden Deutschlands
 - Nokia im Süden Deutschlands
- Mast
 - Schleuderbeton
 - Stahl (Rohr- oder Gittermast)
 - GFK
- Fundament
 - Bohrfundament
 - Rammrohrfundament
 - Korbfundament
- Antennen
 - Kathrein / Ericsson / Commscope
 - Einfachband / Mehrfachband (617–2690/4200 MHz)
 - Rundstrahler / Strahlerkabel / Öffnungswinkel eng–weit
 - mechanisch oder elektrisch neigbar

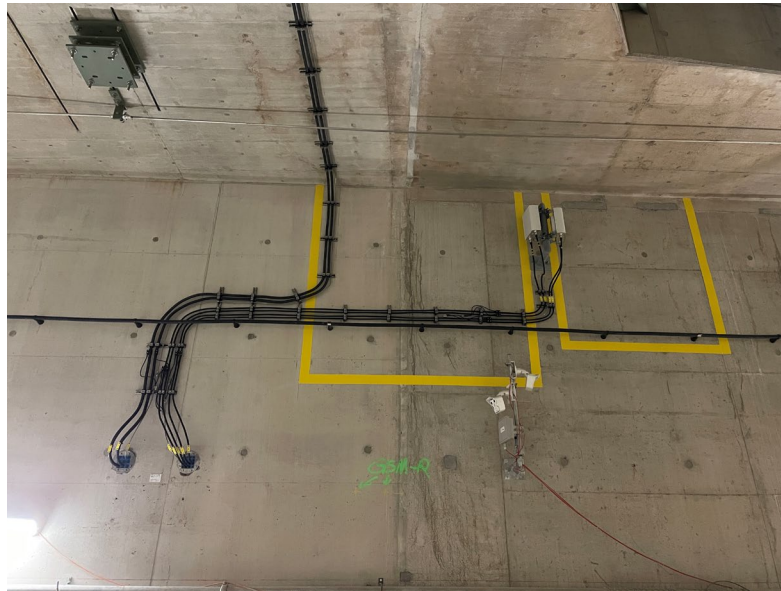


Bild 6



Bild 1



Bild 2

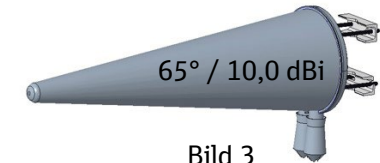


Bild 3



Bild 4



Bild 5

8-Port-Sektor-Antenne
4x 694–960 MHz
4x 1695–2690 MHz
85° Öffnungswinkel

Rechte Abbildung Bild 1: Datenblatt_80010753 (www.kathrein.de) / Bild 2: Datasheet Antenna 3402 1L 2M 1.4m (KRE 101 2559/1 Rev. D © Ericsson AB 2024)

Bild 3: Datasheet KRE1012571-1_LZT1382373_Rev-A (© Ericsson AB 2023) / Bild 4: Datenblatt RRVV-85D-R4N43 Antenne Commscope (©2024 CommScope, Inc. All rights reserved.)

Bild 5: 80010846_Datenblatt (www.kathrein.de) / Bild 6: Stuttgart Hauptbahnhof mit gelb markierten Warnbereichen (Thude)

GSM-R-Standorte mit Mast werden immer individuell geplant.



GSM-R-Standort im Freifeld im März 2025
(Fotos: Ulrich Thude)



Gemeinsamer Standort von GSM-R und öffentlichem
Mobilfunk im Freifeld im März 2025 (Fotos: Ulrich Thude)



GSM-R-Standort im Raum Fulda im März 2025 (Fotos: Ulrich Thude)

GSM-R-Standorte verschiedener Systemtechnik-Bauformen



Außenbereich



GSM-R-Standort im NOKIA-
Outdoorschrank

Innenbereich



GSM-R-Standort im NOKIA-Indoorschrank in
Betonschaltheus



GSM-R-Splitter & Jumperkabel-Einführung
(staubgeschützt nach IP54)



GSM-R-TK-Raum Tunnel im Rittal-Schrank
(staubgeschützt nach IP54)

Nach Änderungen im Funkfeld sind Kontroll- und Abnahmemessungen nach EIRENE notwendig.

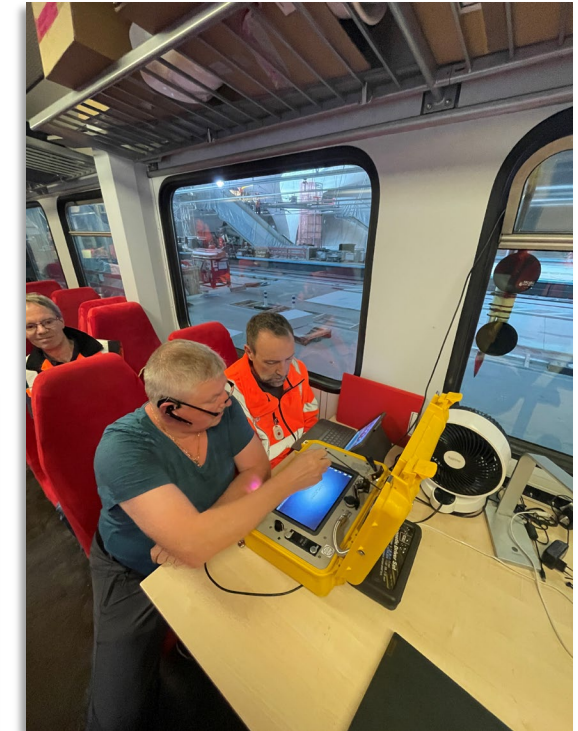


Die Abnahme des Funkfeldes geht nur mit einem der zwei Funkmesswägen, die ein Jahr im Voraus zu buchen sind.



Korrekturen der Antenneninstallation in einer Triorail-Messung, statisch und mobil auf dem Ranger.

Dieses Verfahren dient auch als Kontrolle vor und nach Umbau einer Station zum Nachweis des unveränderten Funkfeldes.



Testaufbau einer mobilen Kontrollmessung in der „Lucy“, einem Mess- und Testwagen von Hitachi.

EIRENE = European Integrated Railway radio Enhanced Network (siehe https://www.era.europa.eu/system/files/2023-09/index033_-_EIRENE_SRS_v1610.pdf)
Regelwerksgrundlage: Richtlinie 860.1206 („Abnahme Funkversorgung Strecke GSM-R Technik 1.0“)
Vertiefend: Stuttgart 21: Erste Züge im künftigen Stuttgarter Hauptbahnhof, Messzug auf Testfahrt (<https://www.youtube.com/watch?v=sM75bK5Omlk>).
Alle Bilder: Thude 2024 / 2025

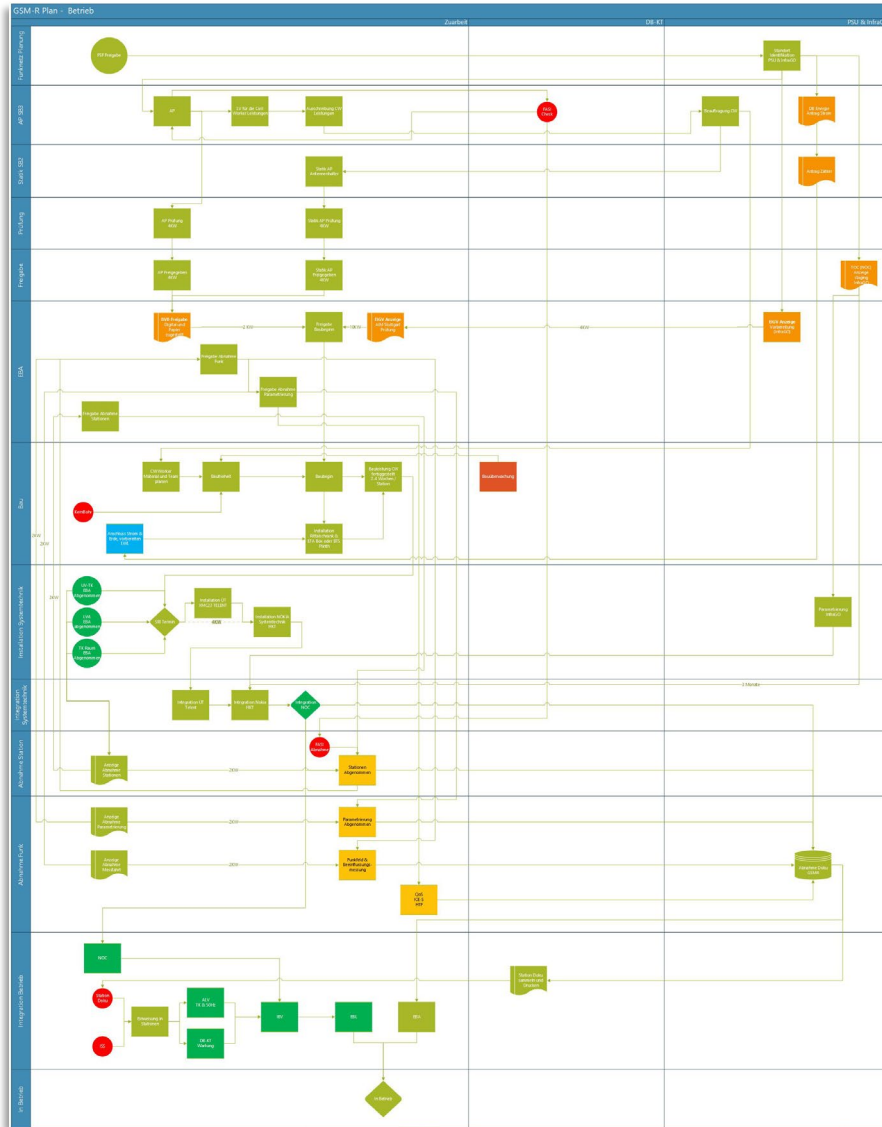
Abnahmeprozess eines standardisierten, typenfreigegeben Bauteils am Standort Scharnhausen



Beispiel der Abnahme einer NEA (Netzersatzeinspeisung):

- NEA als typenfreigegebene Baugruppe gebaut durch die Bahnbaugruppe in Halle.
- Plinth (Sockel) installiert durch Arbeiter
 - Überwacht durch Bauüberwacher TK
- NEA-Schrank aufgesetzt und angeschlossen durch Elektriker der Bahnbaugruppe Freiburg
 - Überwacht durch Bauüberwacher 50 Hz
- Abnahmeprüfer 50 Hz aus Dresden hier im Prozess der Abnahme mit allen Bauüberwachern, dem Anlagenverantwortlichen und weiteren Fachkräften.

Beteiligte / Prozesse / Abhängigkeiten zum Bau einer Funkstation ab Ausführungsplanung bis Inbetriebnahme



- Funknetzplanung bestimmt Standort der Funkanlage
- Möglichen Standort vor Ort identifizieren für DB
- Antrag für Standortbescheinigung (STOB) bei der Bundesnetzagentur
- Bauantrag für Standort
- Ausführungsplanung (AP) (Sachbereich 2)
- Ausführungsplanung (AP) (Sachbereich 3)
- Prüfung der AP

Freigabe der AP (Vorlage beim EBA)

- EIGV-Anzeige bei der Bahn (Inbetriebnahmegenehmigung)
- EBA-Beteiligung klären
- Baubeginnanzeige

Bau passive Infrastruktur Side Ready Inspection (SRI)

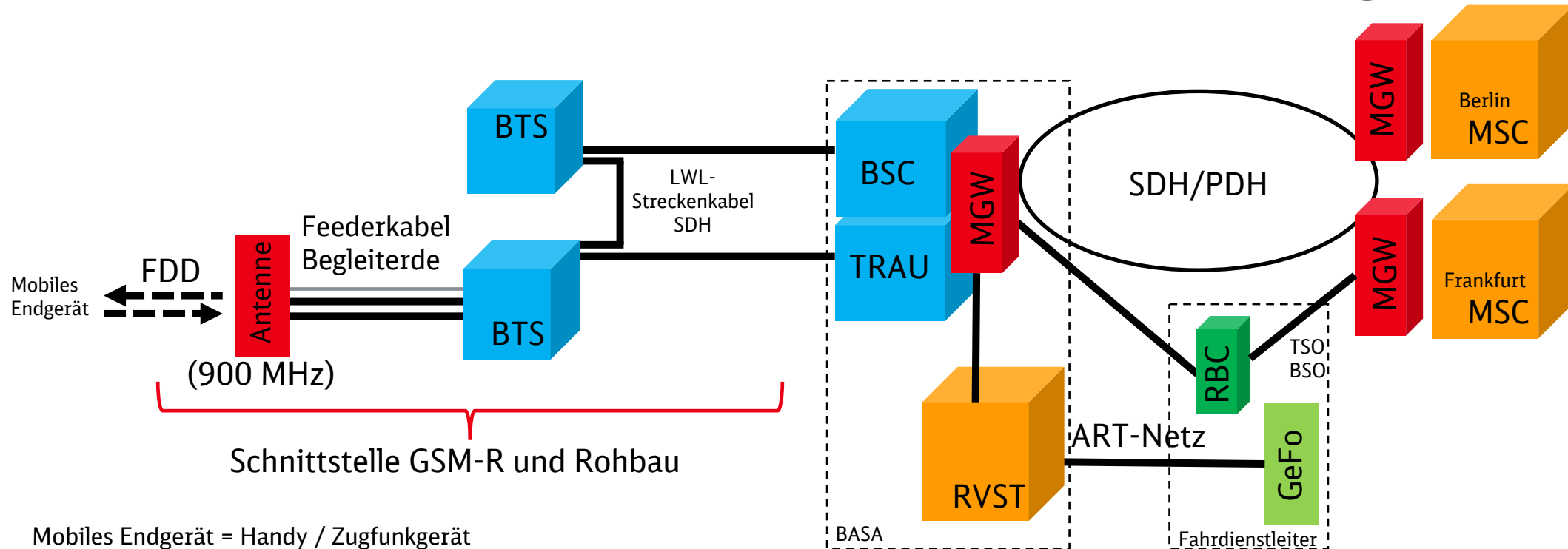
- Installation Systemtechnik
- Integration Systemtechnik
- Abnahme GSM-R Stationen
- Abnahme der Installation durch Fachkraft für Arbeitssicherheit (FaSi)
- Abnahme Funkmessung (Funkmesszug)
- Nacharbeit
- Integration in den Betrieb

In Betrieb

**Fehlende Automatisierung und Tool-
unterstützung des gesamten Prozessablaufes
- Bis zur digitalen Ablage der Dokumentation
in der zentralen Datenbank.**

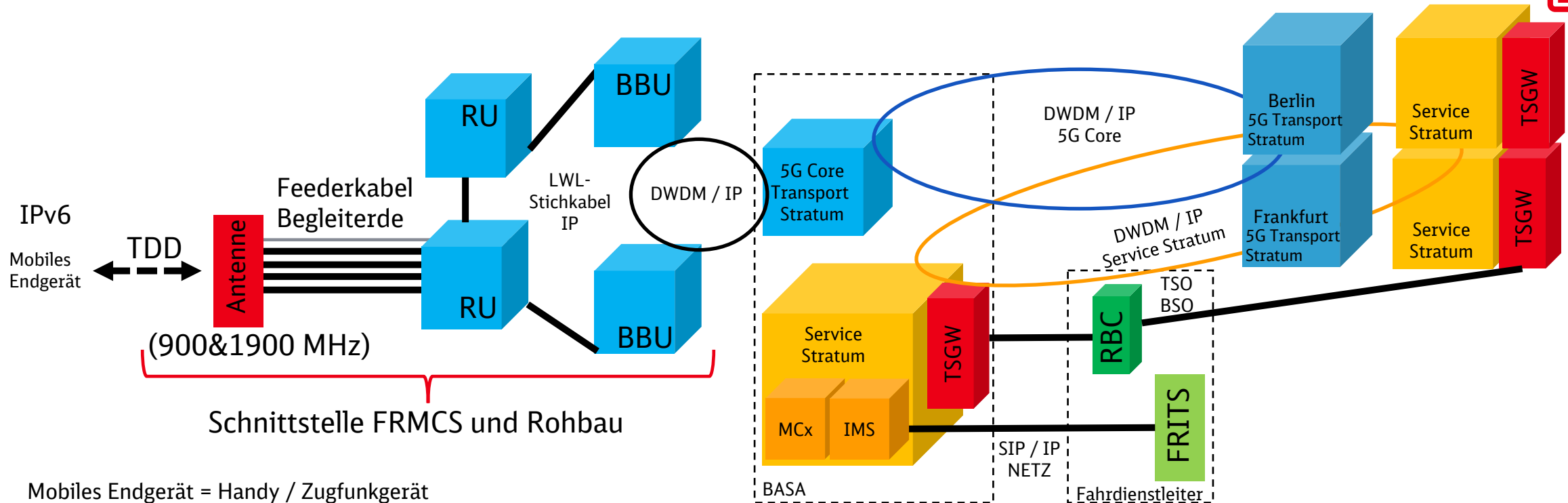
- 1G Analog A-Netz ab 1958 / B-Netz ab 1972 / C-Netz ab 1985
- **2G GSM ab 1992** / GPRS ab 2001 / EDGE ab 2006 (71 Millionen Teilnehmer)
 - Datenraten **GSM 0,0096 Mbit/s** / **GPRS 0,054 Mbit/s** / EDGE 0,250 Mbit/s
- 3G UMTS ab 2004 / HSPA ab 2007 / LTE ab 2006
 - Datenraten UMTS bis zu 0,348 Mbit/s / HSPA 7,2Mbit/s / HSPA 42,2 Mbit/s
- 4G LTE+ ab 2014
 - Datenraten LTE: bis zu 150 Mbit/s /LTE+ 500 Mbit/s & 1000 Mbit/s
- **5G** Next Generation ab 2020
 - Datenraten 5G: bis zu 10.000 Mbit/s / 20.000 Mbit/s
- **Bei der Bahn**
 - **weltweit = 210.000 km**
 - **GSM-R-Netz Europa = 130.000 km**
 - **Deutschland (ab 2002): rund 30.000 km (von >33.000km)**

Welche Bausteine sind für den Mobilfunk GSM-R notwendig?



- Mobiles Endgerät = Handy / Zugfunkgerät
- FDD = Frequency Division Duplex
- Antenne an einer ATK (Antennentragkonstruktion) am Mast oder an der Tunnelwand
- Feederkabel in Durchmessern von ½“ bis 1 5/8“ Zoll
- BTS = Base Transceiver Station (Teil der örtlichen Ausrüstung, im Outdoorschrank, im Indoor-Systemschrank, im RITTAL-Schrank)
- BSC = Base Station Controller (im Technikstandort der Region)
- TRAU = Transcoding Rate and Adaption Unit (Kompression und Dekompression von Sprachinformationen, zur reduzieren des Bandbreitenbedarfs)
- RVST = Rail Vermittlungsstelle
- MGW = Media Gateway
- MSC = Mobile Switching Center (zentrale Vermittlungsstelle für die Verwaltung von Anrufen und Daten)
- RBC = Radio Block Centre
- Netzanbindung über Multiplexer und SDH-Verbindungen (TDM)

Welche Bausteine sind für den Mobilfunk FRMCS notwendig?



- Mobiles Endgerät = Handy / Zugfunkgerät
- TDD = Time Division Duplex
- DWDM = Dense Wavelength Division Multiplexing (Mehrere Lichtwellen in engem Frequenzabstand über eine Glasfaser)
- Antenne an einer ATK (Antennentragkonstruktion) am Mast oder an der Tunnelwand
- Feederkabel in Durchmessern von ½ bis 1 5/8 Zoll.
- RU = Radio Unit
- BBU = Base Band Unit (für max. 5 RU / max. 15 km zur RU)
- TSGW = Trackside Gateway
- MCx = Mission Critical Services (spezielle mobile Kommunikationsdienste und Sprachanwendungen der Bahn)
- IMS = IP Multimedia Subsystem (Vermittlungsstelle)
- RBC = Radio Block Centre (angebunden über IP)
- Netzanbindung über IP / DWDM
- FRITS = FRMCS IP Terminal Service (angebunden über SIP)

Denkanstöße / Offene Punkte eines PM im Fachbereich GSM-R

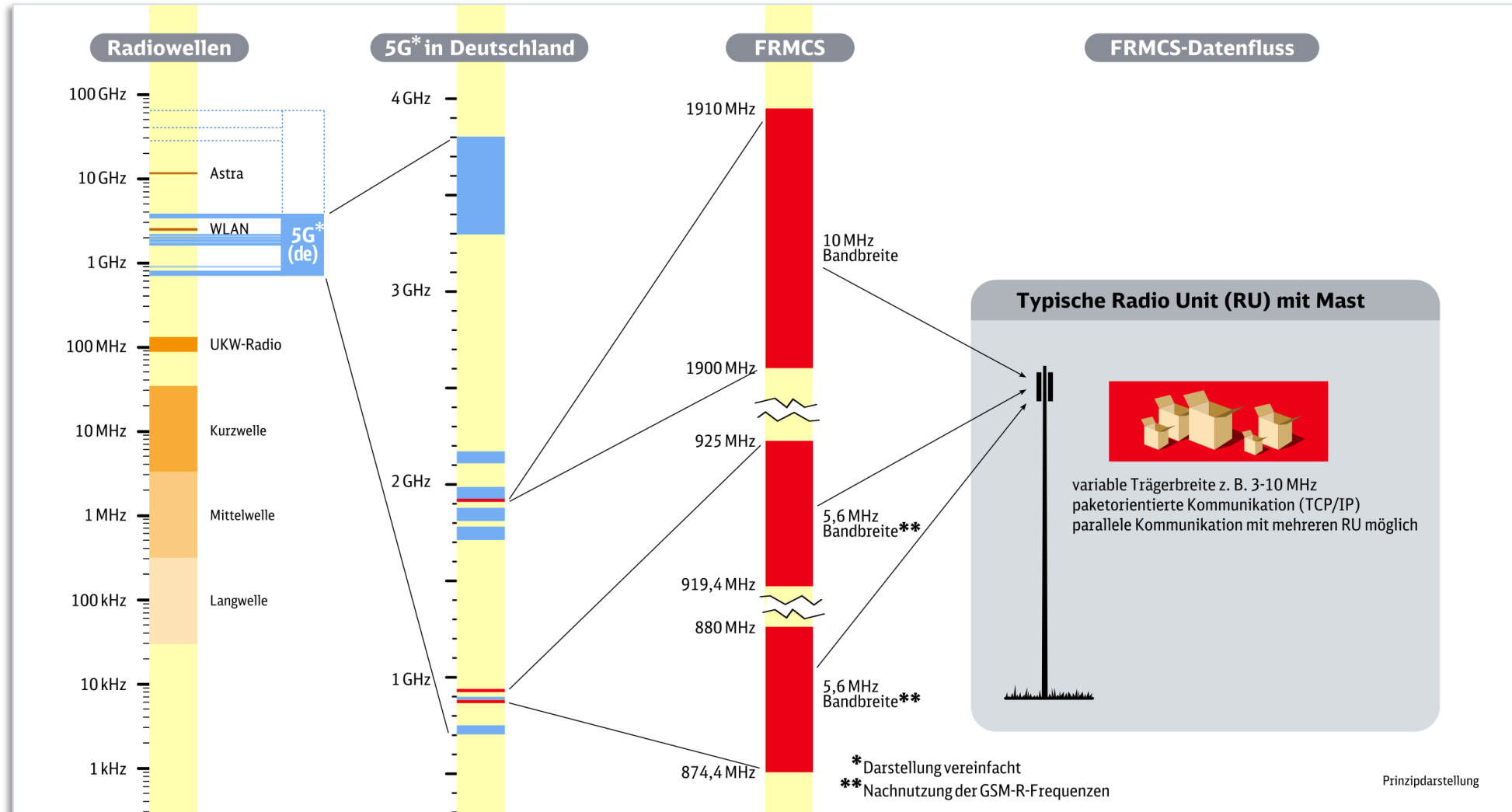


- Schnittstellen zwischen den Gewerken müssen überlappend und koordiniert bearbeitet werden, Modernisierung muss eingeplant werden.
- Rückwärtig kompatibel ist immer eine Einschränkung für wirklichen Wandel und Neuerung, ist aber nicht immer vermeidbar. **Wechsel von GSM-R zu FRMCS ist ein Thema, was derzeit in der Infrastrukturplanung noch nicht durchgehend berücksichtigt wird, vor allem in Anbetracht eines notwendigen Parallelbetriebes und umfangreicher paralleler Ausrüstung für den Übergang/Migrationszeit.**
- Das Kernnetz und das Transportnetz der DB sind im Umbruch. Basierend auf LWL, DWDM und IP als Träger, muss das parallel neu eingebaut werden.
- Die Vorgabe alles nach eigenem Wunsch in Sonderfertigung auszurüsten, kostet Geld und dauert lang in der Entwicklung. Bevor wir etwas Neues entwickeln (lassen), sollten wir das international Verfügbare im eigenen Einsatz testen.
- 35 registrierten GSM-R-Planprüfern in Deutschland reichen nicht aus, um alle notwendigen Baumaßnahmen zu betreuen!
- Die Höhe eines Standardmastes sollten auf 20–25 m angehoben werden. Einfaches Rammrohr-Fundament und kleines Betonschaltheus. Dies ist eine Änderung des Baurechts für die DB, die derzeit nur 15 m ohne Bauantrag zulässt.
- Ohne koordinierte eigene technische Entwicklungsabteilung, im Verbund mit den Universitäten in Deutschland, werden wir nur schwer etwas Neues in kurzer Zeit umsetzen und weiter fehlende Fachkräfte haben, die mehr als das historische Wissen über alte Technik haben. Entwicklung als Team zwischen Universität, Industrie und Deutsche Bahn.
- Der technische Baukasten Bahn braucht immer weitere Bausteine zum Modernisieren. **Modulare Planung und Bau. BIM**
- Die Werkzeugkiste der Bahn hat noch Platz für Neues. Beispiel Messzug GSM-R: Wie viele Abnahmeprüfer mit Erfahrung haben wir für diese Messfahrten, wir brauchen ja nicht nur die wenigen Messtechniker?! Alternative Messverfahren.
- Mehr bahninterner Erfahrungsaustausch regionaler Planer und Projektteams ist auf allen Ebenen erforderlich.
- Die Kollegen, die die Anlagen übernehmen und erhalten, sollten in Planung und Bau eingebunden sein, auch um sich mitzuentwickeln. (FASt)

YouTube-Videos: [Stuttgart 21: So weit ist das Projekt Animationsfilm 2025](#)
[Stuttgart 21: Wie Züge mit GSM-R kommunizieren](#)

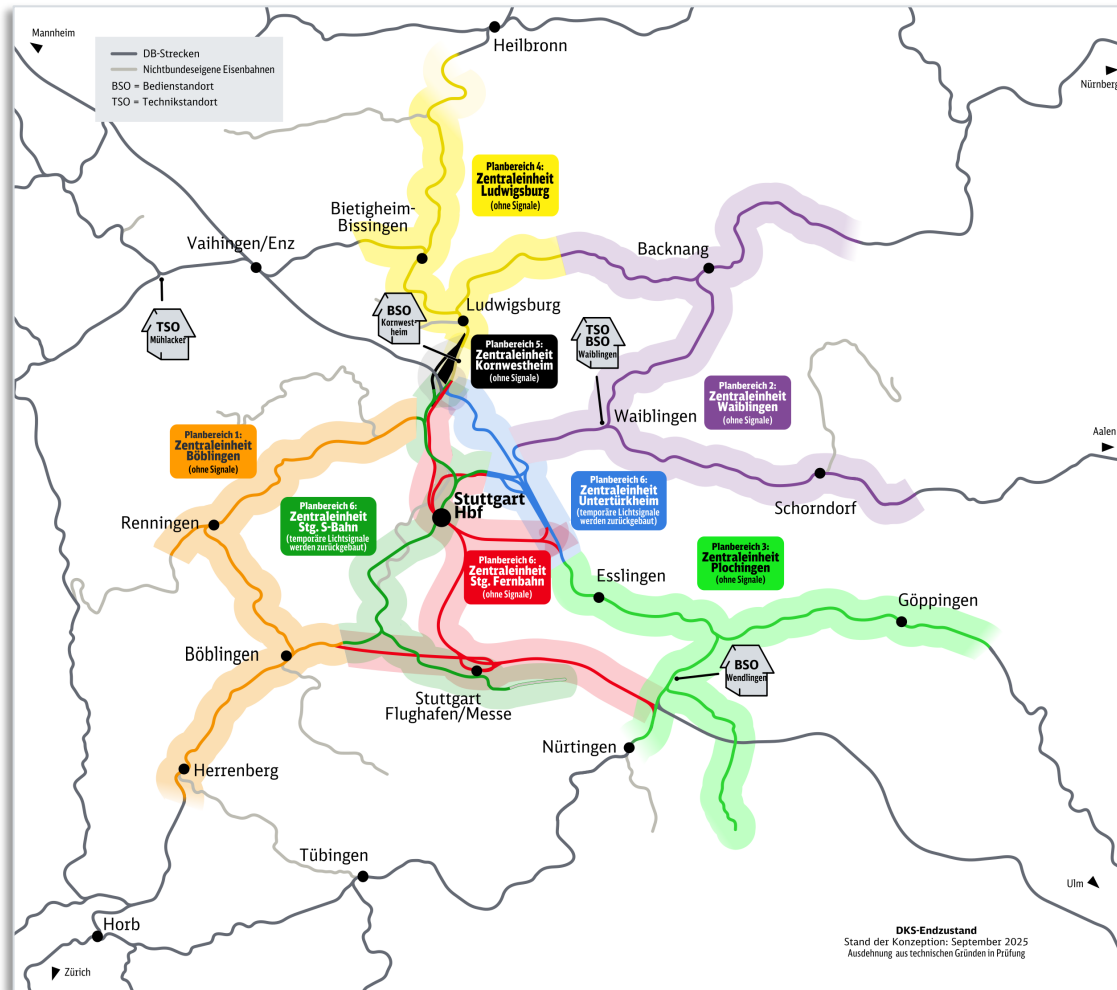
1. GSM-R: Grundlagen und Konzeption im Kernknoten
2. Schnittstellen zwischen GSM-R und Rohbau
- 3. Ausblick**

Der zukünftige Bahnbetriebsfunk FRMCS (zunächst auf Basis von 5G) unterscheidet sich grundlegend von GSM/GSM-R.



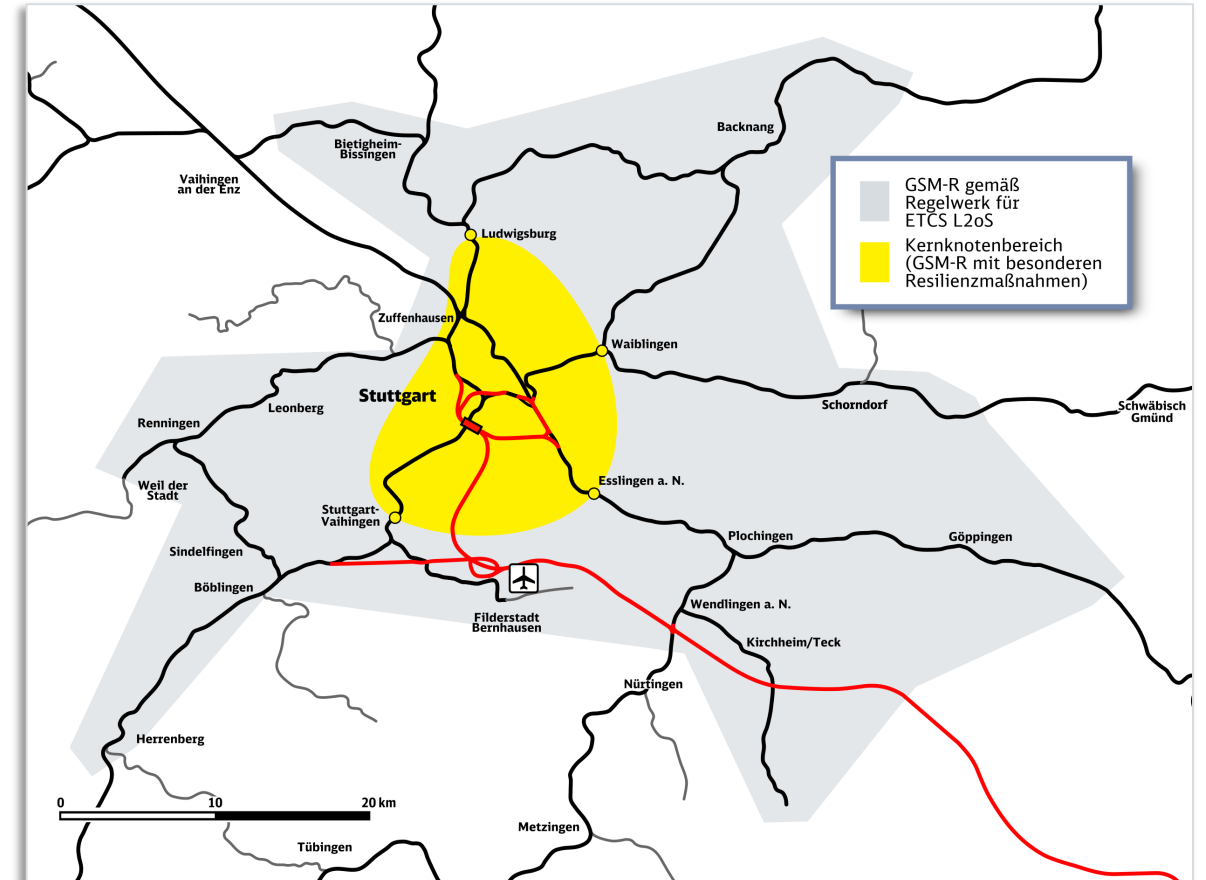
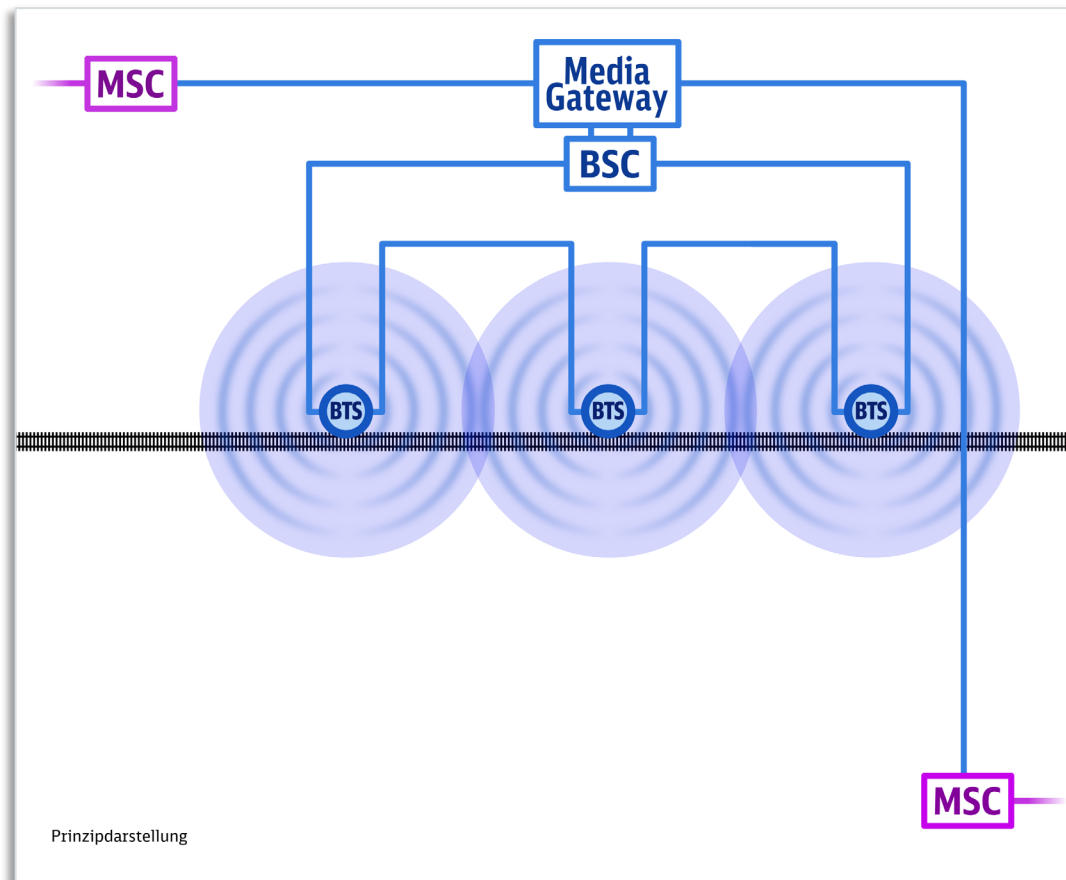
Die Abbildung stellt nicht alle, sondern nur wesentliche mit 5G in Deutschland genutzte Bänder dar.
Vertiefend: <https://de.wikipedia.org/wiki/5G>

Die ursprüngliche Funknetzkonzeption für den Baustein 3 zeigte eine hohe Komplexität.



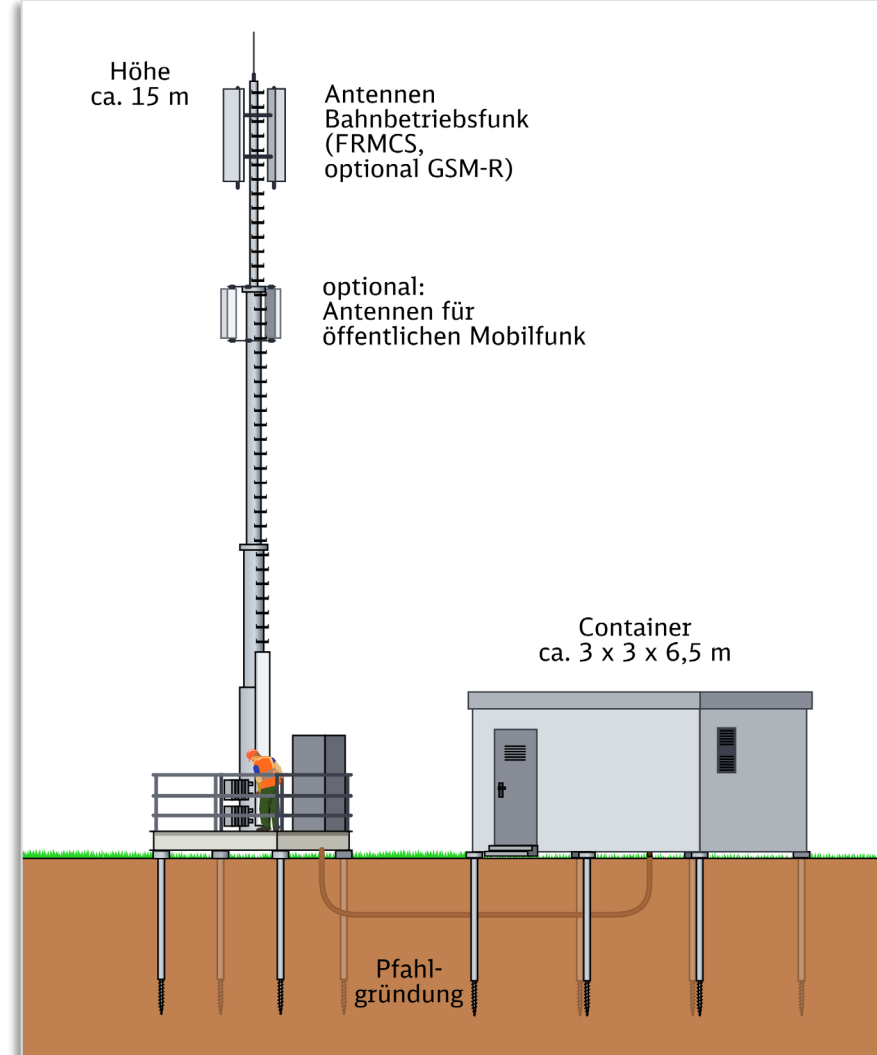
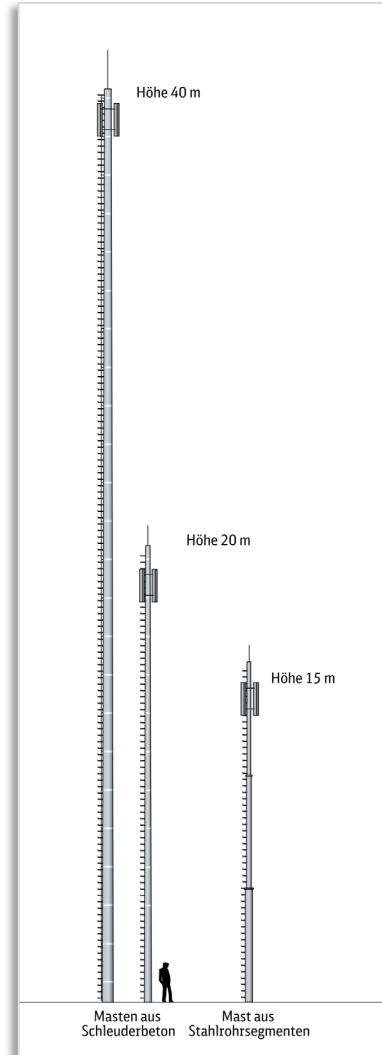
- Im Rahmen des Bausteins 3 wird in den frühen 2030er Jahren
 - das Umland neu u. a. mit ETCS ausgerüstet (ca. 400 Streckenkilometer, bereits mit GSM-R versorgt)
 - der gesamte DKS (rund 500 Streckenkilometer) technisch auf den Endzustand hochgerüstet, u. a. durch FRMCS.
- Im Rahmen der frühen Planung war dabei zunächst vorgesehen,
 - GSM-R ähnlich wie im Kernknoten zu planen und zu bauen (überlappend, alternierend etc.), wodurch zahlreiche neue Basisstationen erforderlich geworden wären,
 - anschließend FRMCS (bei 1900 MHz) aufzubauen und zunächst parallel zu GSM-R 900 zu betreiben sowie dabei
 - besonders breitbandigen öffentlichen Mobilfunk (um 3,6 GHz) optional mit zu berücksichtigen.

Wir haben uns entschieden, im Umfeld von Stuttgart das GSM-R- Bestandsnetz nur noch maßvoll und gemäß Regelwerk auszubauen.



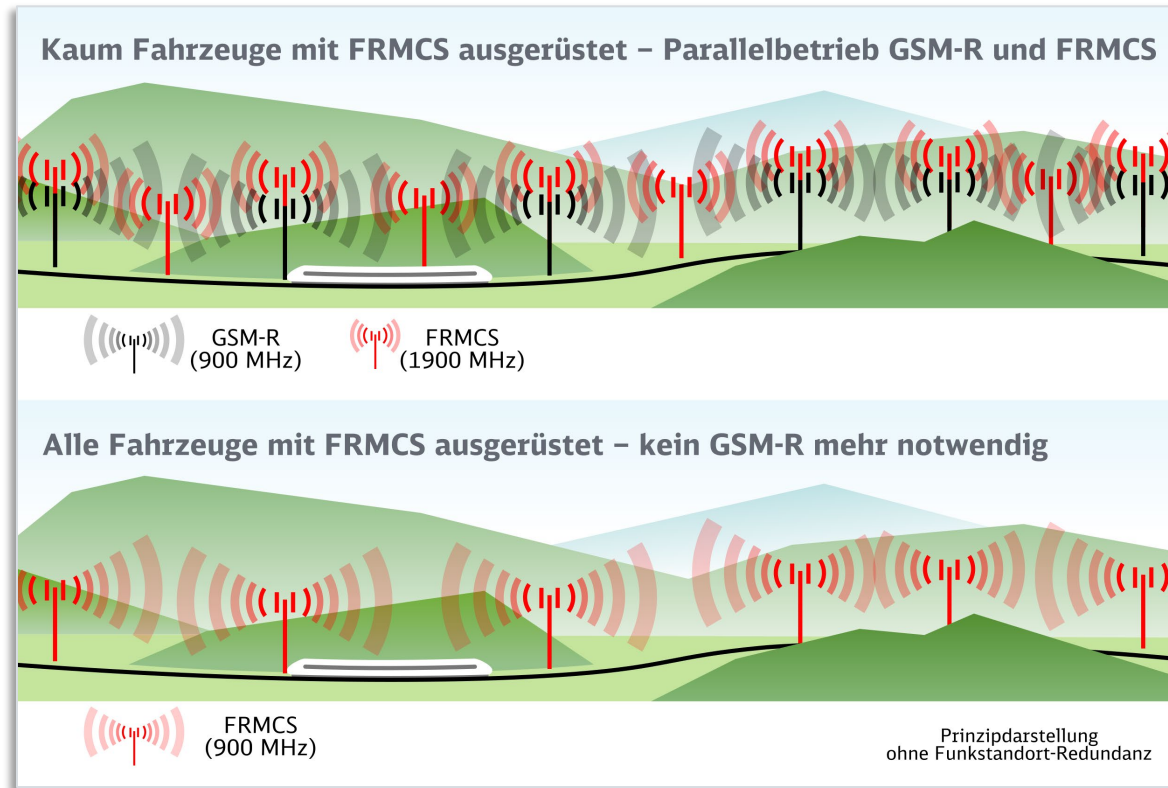
Rechte Abbildung: Kernknotenbereich, in dem GSM-R nach besonders hohen Anforderungen umgesetzt wird (gelb). Der übrige Bereich (grau) wird gemäß Regelwerk ausgerüstet. Dies beinhaltet u. a. eine Anbindung der BTS in Loops (zur Verfügbarkeitserhöhung, linke Grafik), punktuell ergänzte „Füllsender“, Optimierung der Funkausleuchtung und erhöhte Sendeleistungen (durch ohnehin zu erneuernde BTS). Damit wird der Neubau von etwa 50 BTS vermieden. Vertiefend: *Mobilfunk im Digitalen Knoten Stuttgart*. Signal+Draht 5/2025 (<http://bit.ly/40jqcYL>).

GSM-R-Masten sind bislang Manufakturstücke. Zukünftig sollen standardisierte Masten verwendet werden.



Links: Neue Basisstation (BTS) mit 25-m-Mast bei Scharnhausen, nahe dem Stuttgarter Flughafen Mitte: Eindruck der Vielfalt heutiger Masten. Rechts: Standardisierter Funkmast, wie er im Baustein 3 zur Anwendung kommen soll. Vertiefend: *Mobilfunk im Digitalen Knoten Stuttgart*. Signal+Draht 5/2025 (<http://bit.ly/40jcqYL>).

Bei der Migration von GSM-R auf FRMCS zeigen sich eine hohe Komplexität – und auch große Chancen.



- Durch die Verdoppelung der Frequenz (1,9 GHz statt 900 MHz) wird die Reichweite pro se ungefähr halbiert.
- Durch standardisierte, aber in der Regel niedrigere Masten wird die Reichweite weiter reduziert.
- Allein im DKS wären damit voraussichtlich etwa 250 neue Funkstandorte für FRMCS erforderlich, netzweit vsl. mehr als 15.000. Das entspricht jeweils ungefähr einer Vervierfachung der heutigen Standorte.

Große Chancen für zukünftige Vereinfachungen liegen u. a. in

- einer Umstellung von GSM-R auf FRMCS im 900-MHz-Band bei ETCS-Inbetriebnahmen (siehe Abbildung)
- einem GSM-R (mit wenigen Kanälen) parallel zu FRMCS 900
- baulichen Vereinfachungen und Masthöhen
- Bahnbetriebsfunk über öffentliche Netze

Abbildung: Darstellung zweier Extremszenarien. Vertiefend: Vorgehen zur nationalen Umrüstung von Fahrzeugflotten. Vortrag auf dem 23. Signal+Draht-Kongress, 9. November 2023 (<https://bit.ly/3U8bKDv>), FRMCS-Ausrüstung von 463 Triebzügen für den Digitalen Knoten Stuttgart. Signal+Draht 5/2023 (<https://bit.ly/3C5ZetG>) sowie Der Digitale Knoten Stuttgart zwischen Licht und Schatten. Der Eisenbahningenieur 3/2024 (<https://bit.ly/3PBmr6>) und Mobilfunk im Digitalen Knoten Stuttgart. Signal+Draht 5/2025 (<http://bit.ly/40icqYL>).



Vielen Dank
Fragen?

Stuttgart Hauptbahnhof im August 2025
(Foto: Ulrich Thude)

Zusammenspiel von Fahrzeugen, Infrastruktur und Betrieb im DKS (Horizont 2030)

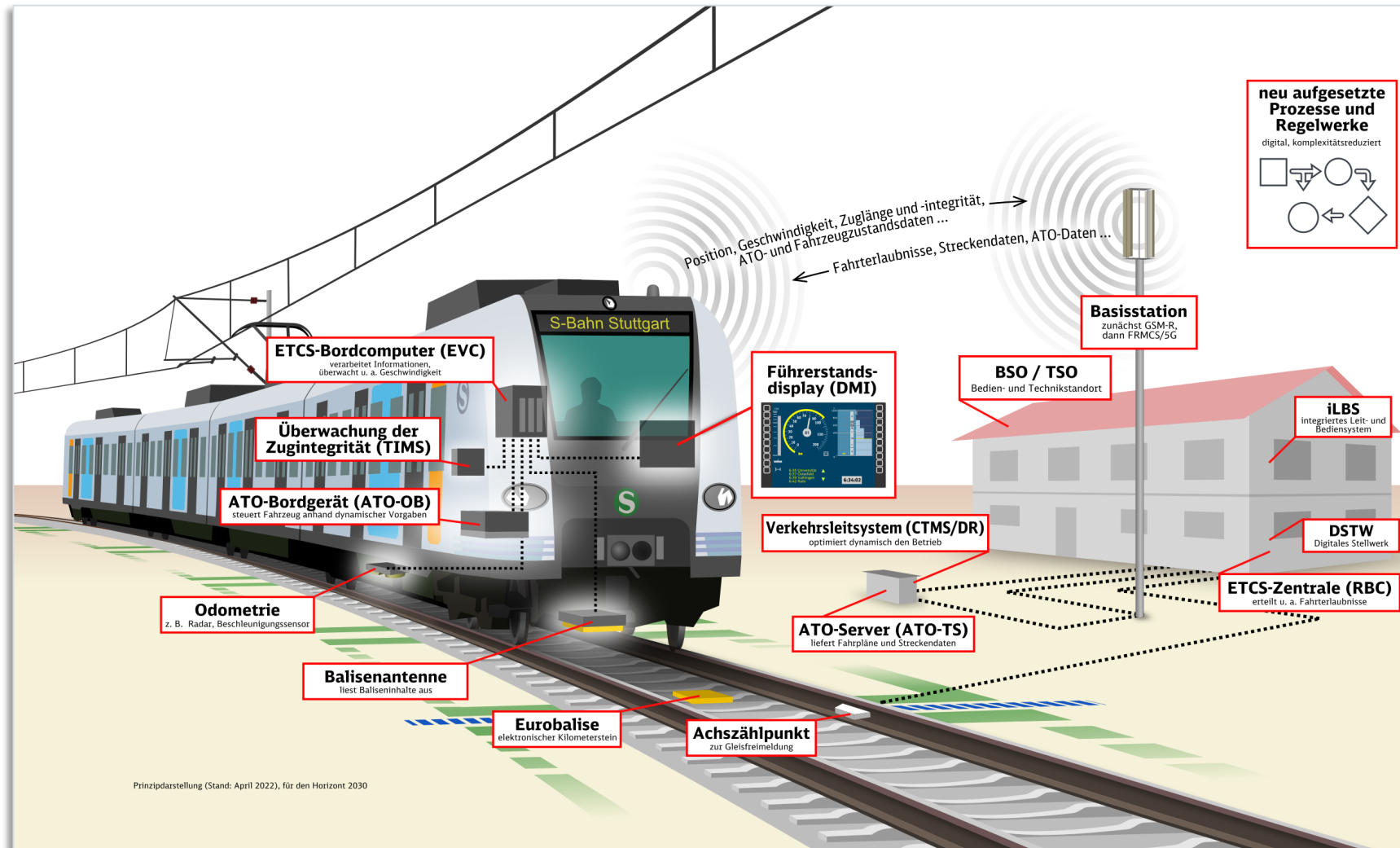


Abbildung: vereinfachte Architektur im Endzustand des DKS (mit Baustein 3, Horizont 2030)

Vertiefend: *Fahrzeugnachsrüstung für den Digitalen Knoten Stuttgart*. Der Eisenbahningenieur 9/2021 (<https://bit.ly/3tFQWUB>).

Abfolge der Inbetriebnahmestufen

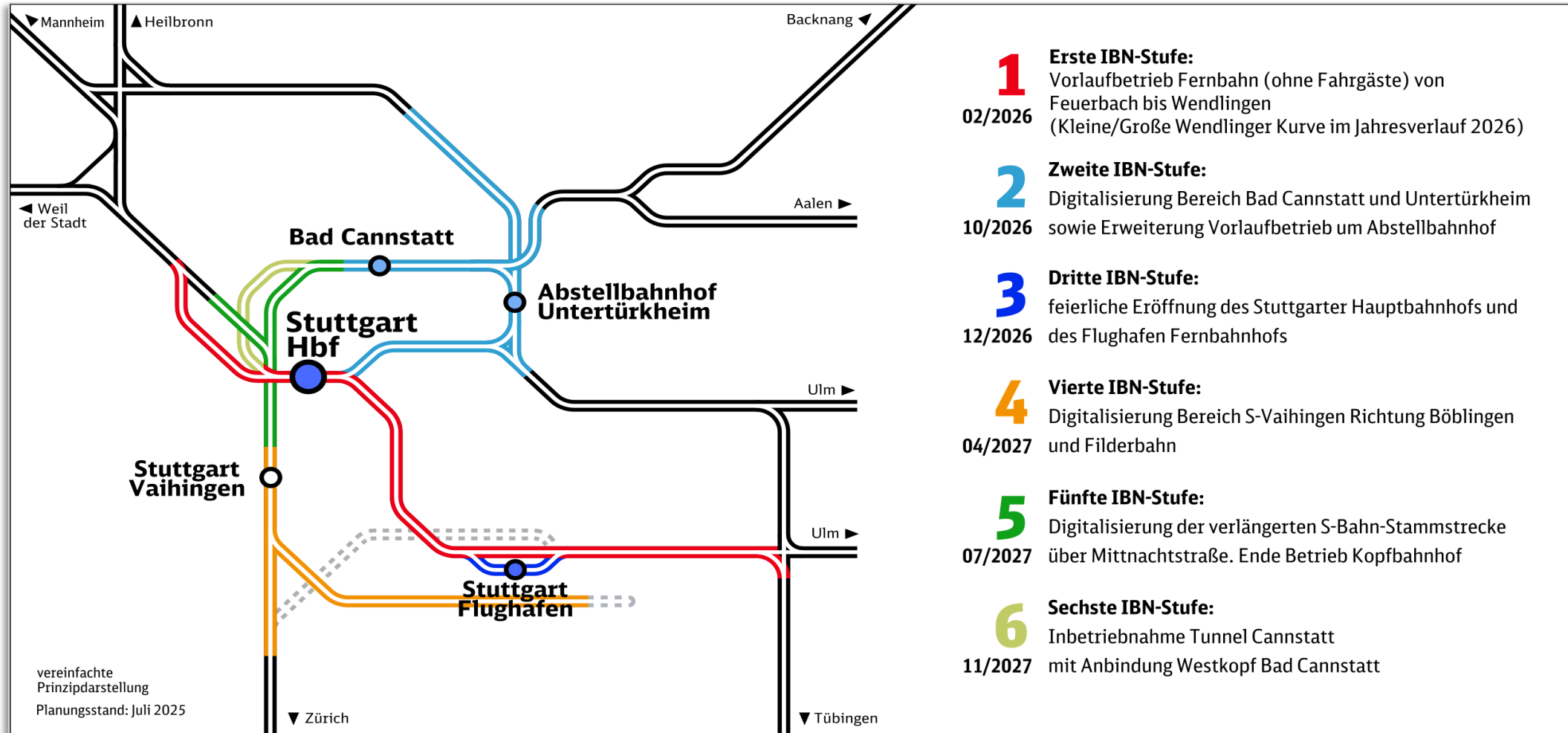


Abbildung: Wesentliche geplante Inbetriebnahmen im Kern des Knotens Stuttgart.
Vertiefend: Präsentation Lenkungsreis vom 18. Juli 2025 (<http://bit.ly/4gfPbFC>)

Für den DKS werden zunächst 517 Triebzüge mit ETCS, ATO GoA 2, FRMCS und weiteren Techniken und Optimierungen ausgerüstet.



Nachrüstung von 333 Regional- und S-Bahn-Triebzügen:

Typ	Hersteller	Anzahl	Baujahre	Konfiguration	Eigentümer	Betreiber	Ausstattung
 BR 423 S-Bahn	ALSTOM (ehemals Adtranz, Alstom LHB)	60	1999 - 2005	4-teilig	DB Regio	DB Regio	PZB
 BR 430 S-Bahn	ALSTOM (ehemals auch Bombardier)	97 58 (2. Serie)	2011 - 2022	4-teilig	DB Regio	DB Regio	PZB
 FLIRT 3 Regionalverkehr	STADLER	13 9 19 14 11	seit 2018 seit 2018 seit 2018 seit 2018 seit 2019	3-teilig 4-teilig 5-teilig 6-teilig "XL", 3-teilig	SFBW	Arverio	PZB PZB, LZB PZB PZB, LZB PZB
 TALENT 3 Regionalverkehr	ALSTOM (ehemals Bombardier)	26 26	seit 2019 seit 2017 (Vorserie)	3-teilig 5-teilig	SFBW	DB Regio	PZB PZB

umzurüstende Triebzüge zusammen: 333

Ausrüstung von 156+28 Regional-Triebzügen „ab Werk“:

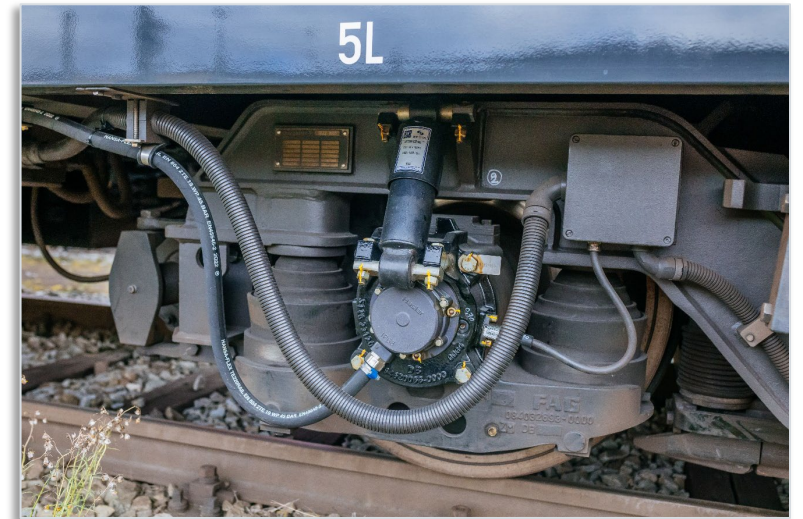
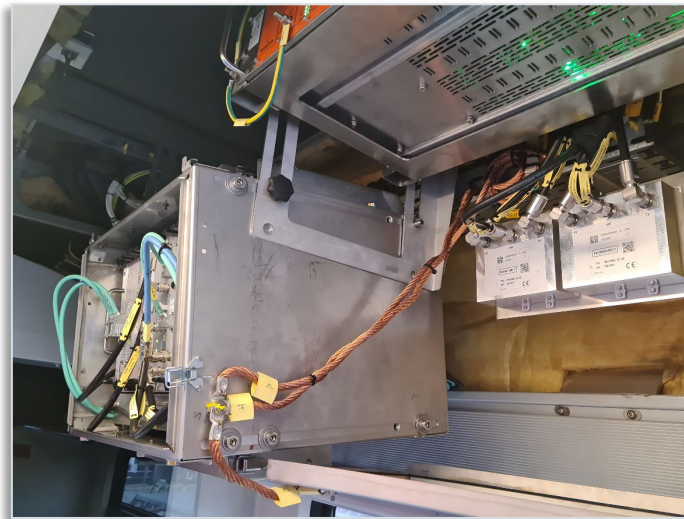
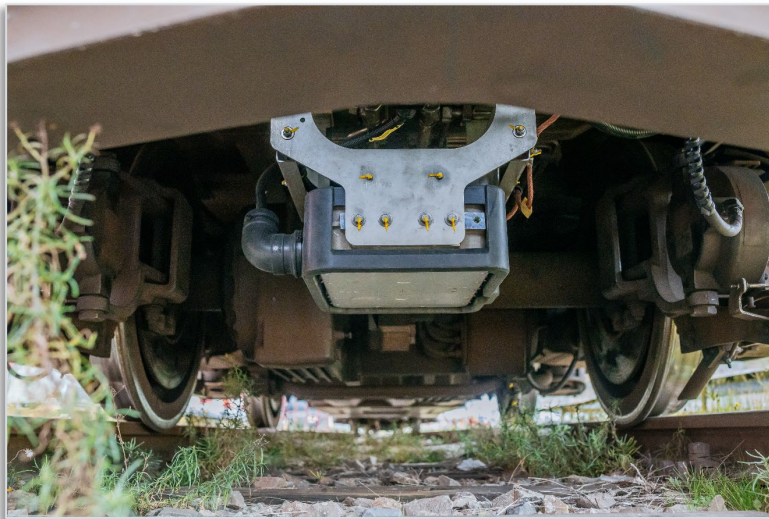


- Die Ausrüstung erfolgt so weit wie möglich „aus einem Guss“. Der tiefgreifende Eingriff für ETCS wird genutzt, um eine Reihe weiterer Systeme und Optimierungen zu integrieren, darunter:
- hochautomatisiertes Fahren (ATO GoA 2, mit Tf) einschließlich Fahrzeugzustandsdaten (TCR)
- Zugintegritätsüberwachung
- **das GSM-R-Nachfolgesystem FRMCS**
- Cold Movement Detection
- Sämtliche Optimierungen machen in Summe etwa 10 % der Serien-Umrüstungskosten (ca. 350.000 bis 400.000 €/Zug) aus.
- Die Inbetriebnahme erfolgt in zwei Stufen (zunächst insbesondere ETCS, später insbesondere FRMCS).
- Abseits des DKS besteht für derartige Optimierungen bislang kaum Anlass bzw. Anreiz.

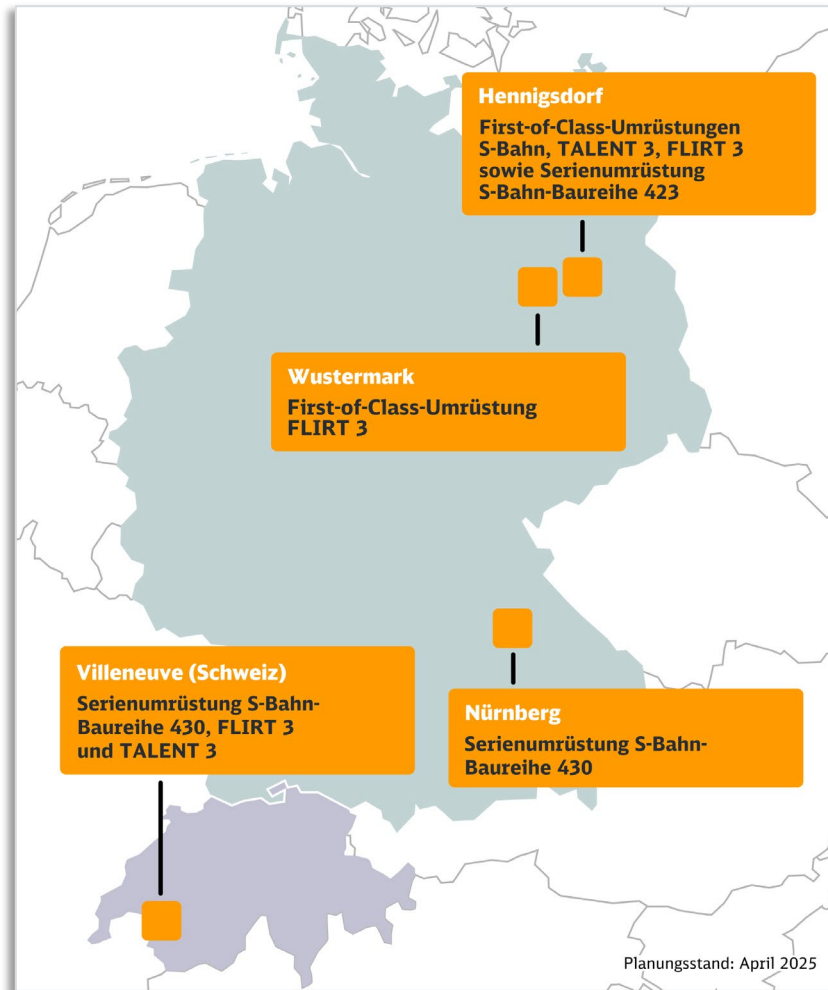
Vertiefend: *Fahrzeugnachrüstung für den Digitalen Knoten Stuttgart*. Der Eisenbahningenieur 9/2021 (<https://bit.ly/3tFQWUB>), *Nachrüstung von Nebenfahrzeugen für den Digitalen Knoten Stuttgart*. Der Eisenbahningenieur 6/2023 (<https://bit.ly/3qURLLK>), *Erfahrungen mit der Digitalen Schiene Deutschland in Baden-Württemberg*. Der Eisenbahningenieur 6/2024 (<https://bit.ly/4cQKLT3>), *Quo vadis DSD-Fahrzeugausrüstung?* ETR 6/2024 (<https://bit.ly/4bZ4VJI>) sowie *Die Fahrzeugausrüstung für den DKS ist in vollem Gang* (<https://bit.ly/4d4v5g4>). Nicht dargestellt ist die Nachrüstung von Nebenfahrzeugen.

DB Projekt Stuttgart-Ulm GmbH / DB InfraGO AG | I.GVE / I.ITL 8 | Dresden | 23.10.2025

Einige Eindrücke der umgerüsteten Triebzüge: ATO-Taster, DMI, Redesign, Balisenantenne, klappbarer EVC, Wegimpulsgeber



Inzwischen wurden mehr als 50 Triebzüge (Baureihe 430) ausgerüstet und werden wieder im Fahrgastbetrieb eingesetzt.



Links: Umrüstorte. Rechts: Die ersten drei im Fahrgastbetrieb eingesetzten Triebzüge, am 3. März 2025 in Bad Cannstatt. Vertiefend: *Sachstand Digitaler Knoten Stuttgart*. Der Eisenbahningenieur 1/2025 (<https://bit.ly/40EhUg3>) sowie *Die Umrüstung von S-Bahn-Triebzügen für den Digitalen Knoten Stuttgart*. Eisenbahn-Revue International 3/2025 (<https://bit.ly/3HlofqI>) und 4/2025 (<https://bit.ly/4kiJNly>) sowie *Die Fahrzeugausrüstung für den DKS ist in vollem Gang* (<https://bit.ly/4d4v5g4>). Stand der Triebzug-Anzahl (51): am 20. Oktober 2025.

Nach einem Jahr ETCS-L2oS-Betrieb auf Wendlingen–Ulm zogen wir eine insgesamt positive Bilanz, mit einzelnen Kinderkrankheiten.



www.eurailpress.de/archiv/wendlingen+ulm

LEIT- UND SICHERUNGSTECHNIK

Ein Jahr (ETCS-)Betriebserfahrungen auf der SFS Wendlingen–Ulm

Bei einer insgesamt sehr positiven Bilanz wird an vielen Stellen auf hohem Niveau weiter optimiert.

ANDREAS GÖTTIG | FELIX GRIMMINGER | KARSTEN HIRSCH | VOLKER KAMMANN | TOBIAS PAWLIK | FLORIAN ROHR | RÜDIGER SPRAUER | KARL-EUGEN STIER

Nach fast 30000 kommerziellen Zugfahrten fällt eine erste Bilanz zum Betrieb der Schnellfahrstrecke (SFS) Wendlingen–Ulm insgesamt sehr positiv aus. In besonderem Fokus stand und steht dabei die Ausrüstung der Strecke mit European Train Control System Level 2 „ohne Signale“ (ETCS L2oS), als eine der ersten derartigen Strecken in Deutschland. Gleichwohl in dieser Hinsicht rund 99,8 % der Zugfahrten unauffällig waren, verdienen die wenigen Fahrten mit betriebsbehindernden Störungen einen genaueren Blick. Die Erfahrungen waren und sind Anlass, um im Hinblick auf die weiter voranschreitende ETCS-Einführung auf hohem Niveau weiter zu optimieren. Dabei zeigt sich einmal mehr, wie Eisenbahningenieure entlang des gesamten Systems Bahn gefordert sind – weit über die bloße Verfügbarkeit der Technik der Infrastruktur hinaus.

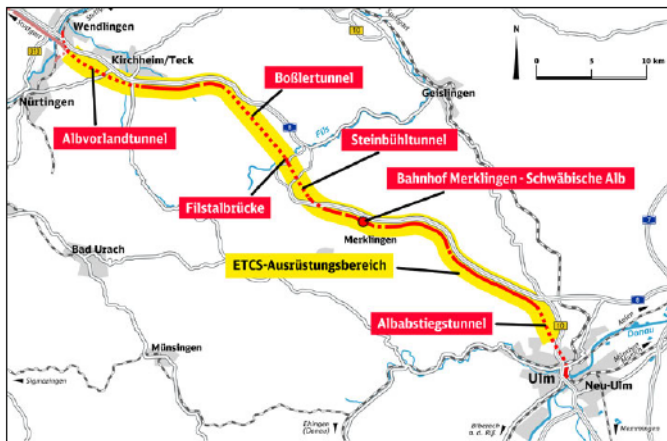


Abb. 1: Die Schnellfahrstrecke Wendlingen–Ulm ist mit ETCS ausgerüstet.

Quelle aller Abb.: Deutsche Bahn AG

2017 in Betrieb genommenen Abschnitten gleichwohl gering: So wurden im Fernverkehr Erfurt–Halle/Leipzig und Ebensfeld–Erfurt nur 0,3 Verspätungsfälle pro Tag aufgrund von



Ausrisse: Ein Jahr (ETCS-)Betriebserfahrungen auf der SFS Wendlingen–Ulm. Der Eisenbahningenieur 2/2024 (<https://bit.ly/49lIOWr>).

Rechts: Darstellung der Abläufe, die zu fünf Warmstars des RBC der Strecke geführt hatten.

Zur Erinnerung: Dem ETCS-Einstieg geht ein Funkaufbau voraus. Die erste Fahrterlaubnis wird vor dem Grenzsinal erteilt.

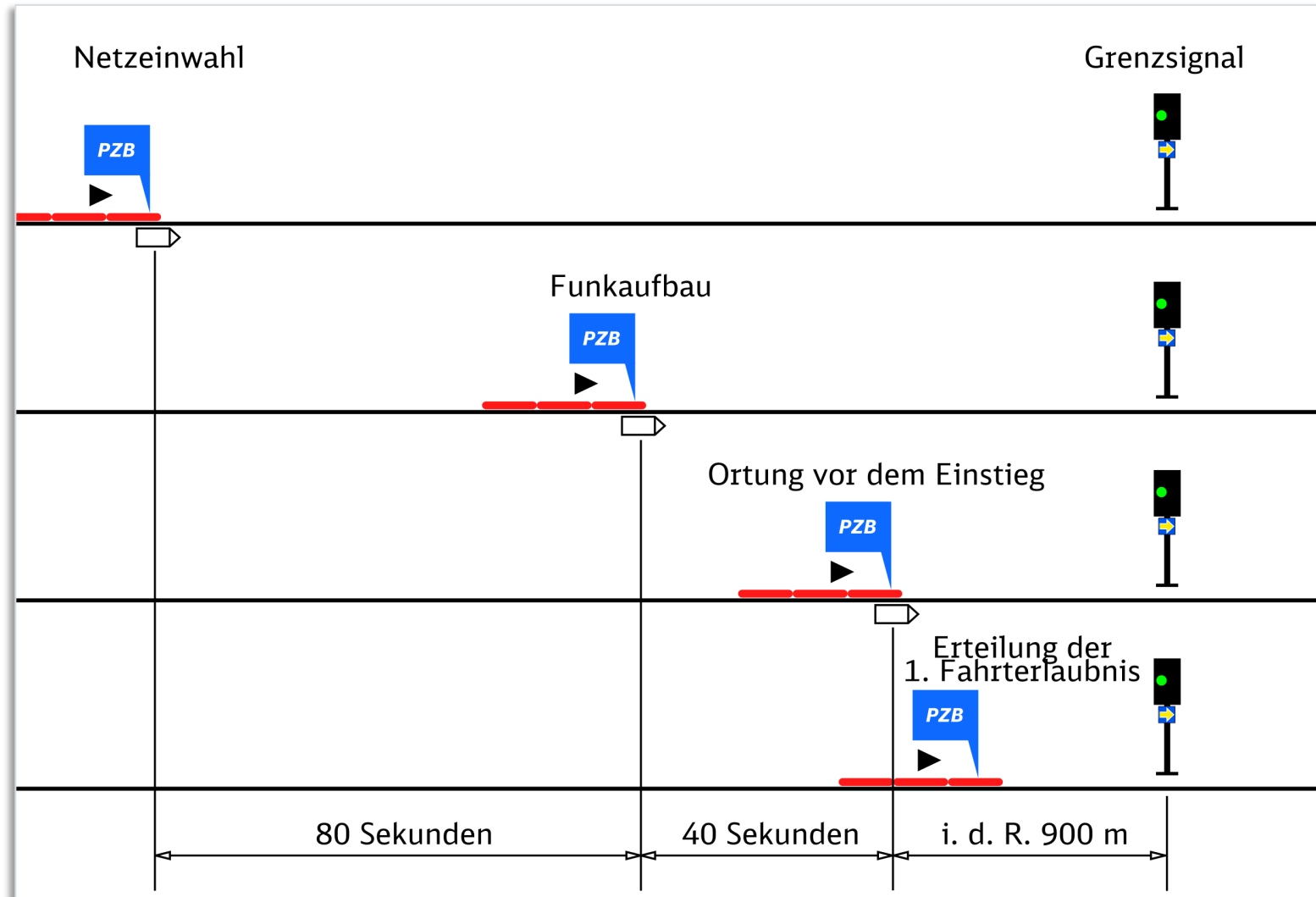
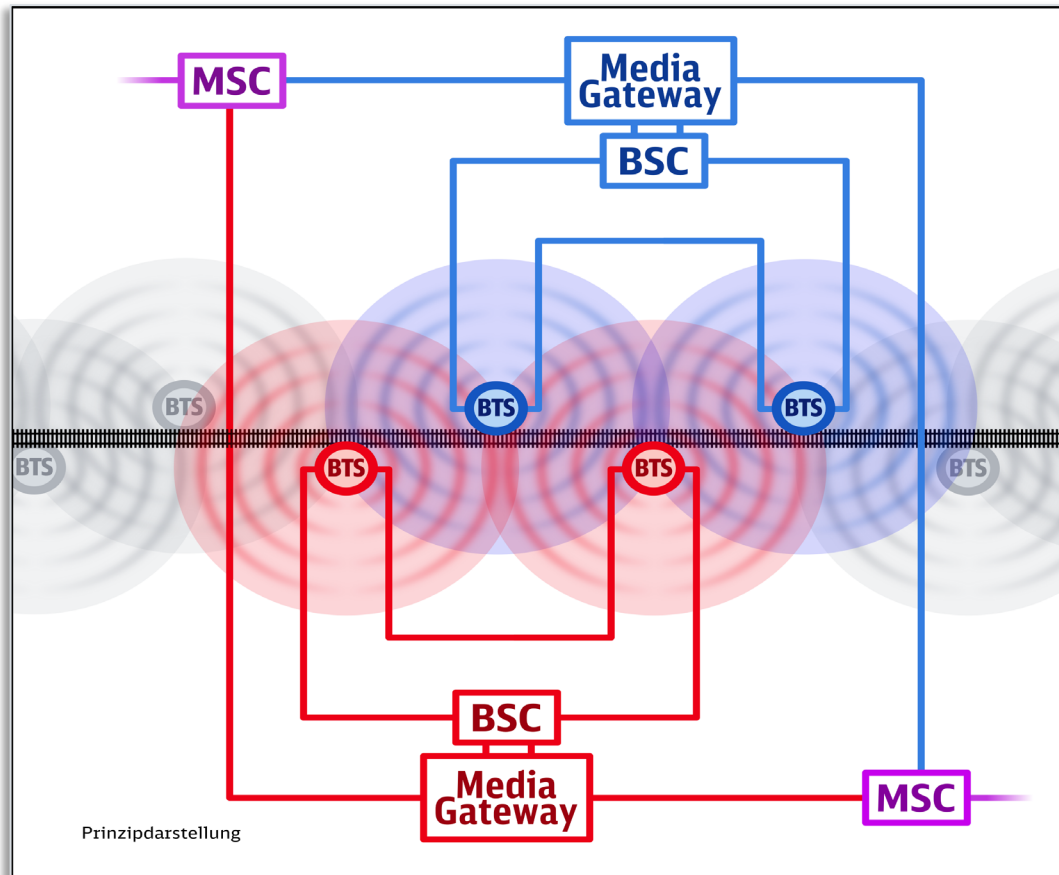


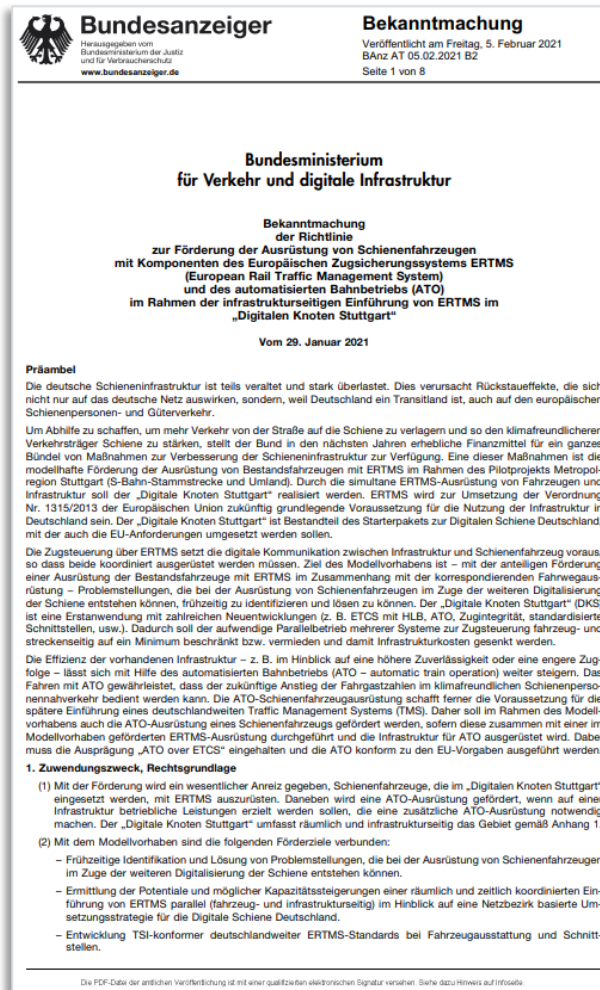
Abbildung: Netzeinwahl (entspricht Einschalten eines Handys) und Funkaufbau (entspricht Rufaufbau bei einem Handytelefonat). Die erste Fahrterlaubnis wird erteilt, wenn das Triebfahrzeug der ETCS-Zentrale (RBC) die Balisengruppe vor dem Grenzsinal zurückmeldet. Der Wechsel nach ETCS Level 2 erfolgt „hinter“ dem Grenzsinal.

Zwei von vielen Facetten eines robusten Gesamtsystems: voll redundantes GSM-R, gedoppelte Displays (DMI)



Linke Abbildung: Alternierende Anbindung von in verdichteten Abständen aufgestellten GSM-R-Basisstationen (BTS) an die übergeordneten „Vermittlungsstellen“ (BSC). Rechts: Bei den für den DKS aus- und nachgerüsteten Zügen sind je Führerraum zwei Displays vorhanden. (Abbildung: Baureihe 430). Vertiefend: *Robuste LST-Infrastruktur im Digitalen Knoten Stuttgart*. Der Eisenbahningenieur 11/2022 (<https://bit.ly/3hiu0ZL>) sowie *Nachrüstung von 333 Triebzügen für den Digitalen Knoten Stuttgart*. ZEVrail 5/2022 (<https://bit.ly/3DHZi0S>).

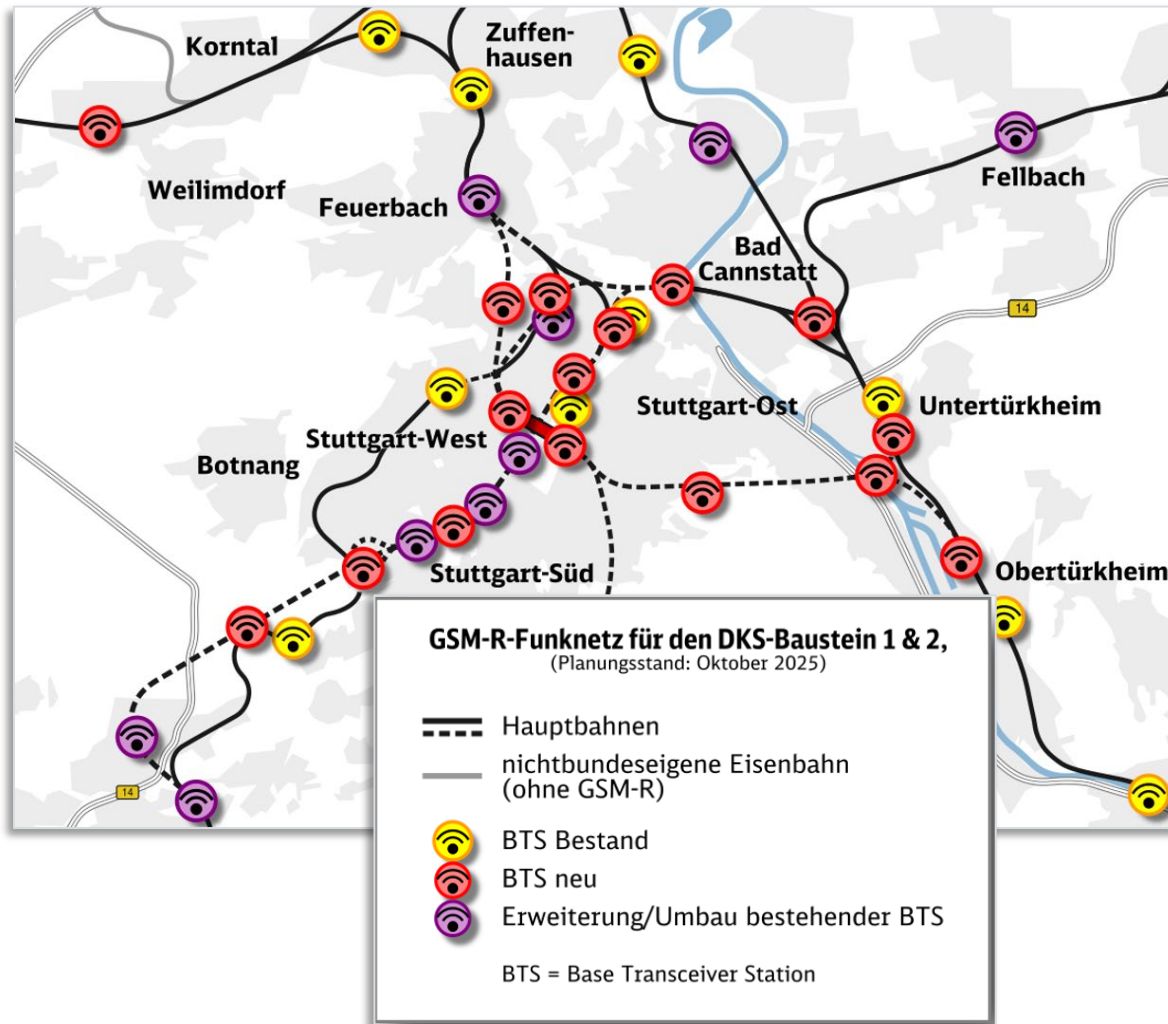
Wesentliche Erfahrungen aus der Konzeption und Umsetzung der DSD-Ausrüstung von 622 Triebzügen in Baden-Württemberg.



- Der Bund fördert im DKS erstmals die Fahrzeugausrüstung mit ETCS und weiteren Techniken der DSD (Abbildung).
- Die Förderung ist für Triebzüge an 24 technische Bedingungen geknüpft, darunter ATO GoA 2, „ETCS Level 3“/TIMS und optimierte Bremskurven.
- Etwa 90 Prozent der Kosten der Serienausrüstung fallen für bloßes ETCS an, auf sämtliche weitere Optimierungen entfallen in Summe nur etwa 10 Prozent.
- EVU/Fahrzeugbetreiber haben per se wenige Anreize, sich bei der „digitalen“ Fahrzeugausrüstung kapazitätsschonend zu verhalten.
- Die Erkenntnisse aus der Evaluierung der DKS-Förderung unterstreichen die Notwendigkeit, den Rahmen für die DSD-Fahrzeugausrüstung klug zu gestalten, über bloße Netzzugangsbedingungen hinaus. Dazu zählen
 - eine zentrale, schlagkräftige Koordination
 - eine an Bedingungen geknüpfte Förderung
 - Trassenpreisdifferenzierung
 - Nutzentransparenz, insbes. für EVU und Aufgabenträger

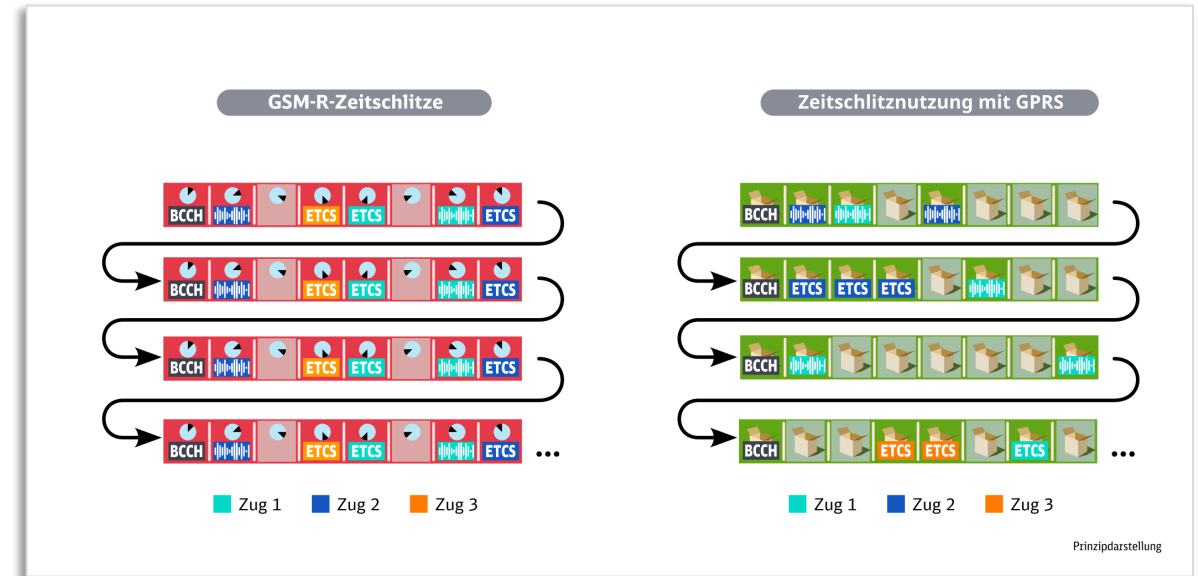
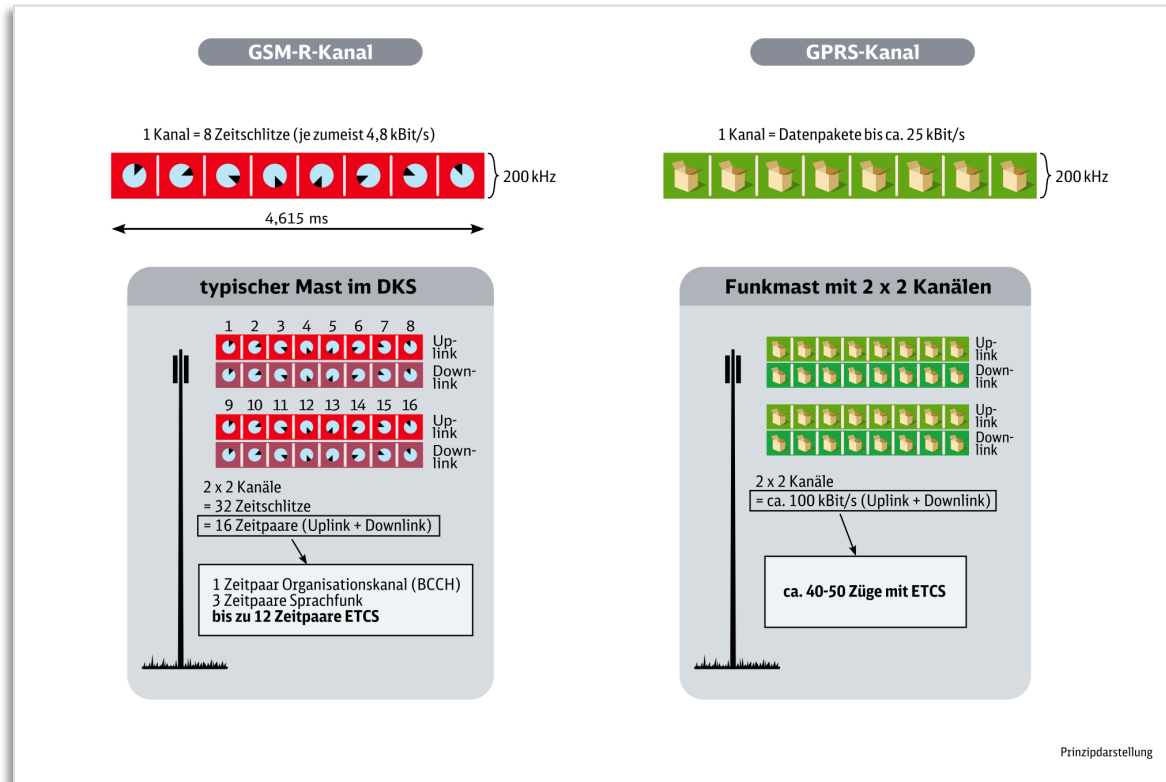
407 Triebzüge/Triebfahrzeuge des Landes Baden-Württemberg (auch außerhalb des DKS) sowie 215 S-Bahnen der DB. Abbildung: Deckblatt der Richtlinie zur pilothaften Förderung der DSD-Fahrzeugausrüstung im DKS (<https://bit.ly/3hX5CJx>) Vertiefend: Förderung der DSD-Fahrzeugausrüstung im Digitalen Knoten Stuttgart. El 4/2023 (<https://bit.ly/3N24h5o>), Erfahrungen mit der DSD in Baden-Württemberg. El 6/2024, Quo vadis DSD-Fahrzeugausrüstung? ETR 6/2024 (<https://bit.ly/4cQKLt3>) sowie Die Fahrzeugausrüstung für den DKS ist in vollem Gang (<https://bit.ly/4d4v5g4>).

Selbst im hochbelasteten Kern des Knotens reicht einfaches GSM-R (mit dem erweiterten Band) aus, um alle Züge in Level 2 zu fahren.



- In Deutschland stehen neben den 19 „Frequenzen“ des interoperablen GSM-R-Bandes auch 15 „Frequenzen“ des erweiterten GSM-R-Bandes zur Verfügung.
- Auf jeder „Frequenz“ können ungefähr 5 Züge parallel in ETCS Level 2 geführt werden.
- Durch die koordinierte Fahrzeug- und Infrastrukturausrüstung beherrscht der Großteil der erwarteten Triebfahrzeuge das erweiterte Frequenzband, GPRS sowie FRMCS.
- Bereits die bloße Nutzung des erweiterten Frequenzbandes schafft ausreichend Funknetzkapazität (mit Reserven, beispielsweise für Rückstauungen).
- Aufgrund vieler Tunnel sind die Bedingungen im Kern des Knotens Stuttgart gleichwohl eher einfacher als in anderen großen Knoten.

Eine Basisstation (BTS) im DKS stellt Kapazität für wenigstens ca. zwölf ETCS-Zugfahrten bereit. Ein „Upgrade“ auf GPRS ist nicht nötig.



Während bei „klassischem“ GSM(-R) Zeitschlitz fest einer Verbindung zugewiesen werden, erfolgt die Zuweisung von Zeitschlitz bei GPRS dynamisch und paketvermittelt. Das Netz kann dabei auch Zeitschlitz „klassischem“ GSM-R und GPRS zuweisen. Wenigstens ein Zeitschlitz je BTS ist durch einen Organisationskanal (BCCH) belegt, über den beispielsweise Teilnehmer gerufen oder angemeldet werden. GPRS ist im DKS kapazitiv nicht erforderlich, soll aber zur Pilotierung der ETCS-Funktion „Online Key Management“ eingeführt werden.