

Erste FRMCS / 5G-Testumgebung in Deutschland für das Bahnsystem aufgebaut

First FRMCS / 5G test environment for the railway system built in Germany

Jan Koernicke | Maksym Tyrskyi | Christian Schwass | Manfred Taferner

Im Digitalen Testfeld Bahn im Erzgebirge haben DB Netz, Nokia und Kontron Transportation ein 5G und Mission Critical Service (MCx) basiertes Kommunikationsnetz für die Erprobung des zukünftigen Bahnfunkstandards FRMCS (Future Railway Mobile Communication System) aufgebaut und getestet. Der Aufbau des FRMCS-Systems erfolgte von Oktober 2021 bis März 2023 und soll in Zukunft die Erprobung des Zusammenspiels von neuen Technologien der Digitalen Schiene Deutschland (DSD) mit der FRMCS-Übertragungstechnik in der Praxis ermöglichen. Gleichzeitig wird damit eine Test- und Validierungsplattform für die FRMCS-Standardisierung und andere Projekte bereitgestellt.

1 Projektüberblick

Die Sektorinitiative DSD arbeitet an einer weitreichenden Digitalisierung des Bahnsystems. Neue digitale Technologien wie z. B. modernste Sensorik für Umfeldwahrnehmung, vollautomatisiertes Fahren oder ein KI-basiertes Verkehrsmanagementsystem werden zukünftig im Bahnsystem Einzug halten. Dadurch entstehen zahlreiche neue Anwendungsfälle mit sehr anspruchsvollen Anforderungen an die Datenkommunikation, die das aktuelle Funksystem GSM-R nicht mehr erfüllen kann. Zukünftig wird daher das neue, leistungsfähigere 5G-basierte Mobilfunksystem FRMCS die notwendige Konnektivität zur Verfügung stellen und GSM-R während einer Migrationsphase ergänzen und perspektivisch als neuen Standard ganz ablösen.

Neben der höheren Übertragungsgeschwindigkeit und einer verkürzten Signallaufzeit soll FRMCS gegenüber dem Vorgänger GSM-R auch eine grundsätzlich neue Architektur realisieren: FRMCS sieht eine Trennung von Übertragungs- und Applikationsebene vor, um kompatibel zu zukünftigen Weiterentwicklungen im Bereich Mobilfunk zu bleiben. Daher setzt es sich technisch aus dem sogenannten „Transport Stratum“ und dem „Service Stratum“ zusammen. Das Transport Stratum wird aktuell über 5G Standalone realisiert und bildet die Übertragungsebene für das Service Stratum, welches mit dem 3GPP MCx Framework umgesetzt wird. Das MCx Framework bietet wesentliche Funktionalitäten für kritische Anwendungen wie Authentifizierung, Sprachdienste (Punkt-zu-Punkt & Gruppenkommunikation) sowie Daten- und Videoübertragung. Diese Anwendungen werden für heutige und auch für zukünftige Bahnapplikationen benötigt, so z. B. für das automatisierte Fahren oder für das zukünftig KI-basierte Verkehrsmanagement.

In einer der weltweit ersten FRMCS-Testinstallationen im Digitalen Testfeld Bahn im Erzgebirge stellt Nokia für das Projekt die 5G-Technologie bereit, während Kontron Transportation die MCx re-

In the Digital Railway Test Field in the Ore Mountains (Erzgebirge), DB Netz, Nokia and Kontron Transportation have set up and tested a 5G and Mission Critical Service (MCx) based communication network for testing the future railway radio standard FRMCS (Future Railway Mobile Communication System). The FRMCS system has been set up from October 2021 until March 2023 and is intended to enable the interaction of new technologies of Digitale Schiene Deutschland (DSD) with FRMCS transmission technology to be tested in practice in the future. At the same time, the network will provide a test and validation platform for FRMCS standardization and other projects.

1 Project overview

The DSD sector initiative is working on the far-reaching digitalisation of the rail system. New digital technologies such as state-of-the-art sensor technology for environmental perception, fully automated driving or an AI-based traffic management system will find their way into the railway system in the future. This will give rise to numerous new use cases with very demanding data communication requirements that the current GSM-R radio system can no longer meet. The new, more powerful 5G-based FRMCS mobile radio system will therefore provide the necessary connectivity in the future and supplement GSM-R during the migration phase before completely replacing it as the new standard in the long term.

In addition to higher data rates and a shorter signal propagation time, FRMCS should also enable a fundamentally new architecture, compared to its GSM-R predecessor: FRMCS provides for the separation of the transmission and application layers in order to remain compatible with any future developments in the field of mobile radio. It is therefore technically composed of a so-called “transport stratum” and a “service stratum”. The transport stratum is currently being realised via 5G Standalone and forms the transmission layer for the service stratum, which has been implemented using the 3GPP MCx Framework. The MCx framework offers essential functionalities for critical applications such as authentication and voice services (point-to-point and group communication) as well as data and video transmission. These services are required by current and future railway applications, e.g. automated driving or future AI-based traffic management.

Nokia is providing the 5G technology for the project and Kontron Transportation is implementing the MCx in one of the world's first FRMCS test installations in the Digital Rail Testbed

alisiert. Beide Lösungen basieren auf dem aktuellen Mobilfunkstandard 3GPP Release 16. Die DB Netz stellt im Rahmen der Sektorinitiative DSD das Testfeld inklusive Infrastruktur bereit. Insgesamt acht Funkstandorte entlang einer 10 km langen Bahnstrecke, die Glasfaseranbindung sowie der Standort für die Server-Infrastruktur in der Laborzentrale des Bahnhofs Scheibenberg bilden das 5G-Testnetz.

In der ersten Projektphase wurde die Testumgebung erfolgreich aufgebaut und in Betrieb genommen. Im Folgenden soll ein Überblick über die Architektur, die bisher ausgeführten Tests und über relevante bisherige Erkenntnisse gegeben werden.

2 Beschreibung des Test-Setups

2.1 Beschreibung des Testfelds

Im Erzgebirge betreibt die DB Netz in Zusammenarbeit mit der Erzgebirgsbahn ein Testfeld zur Erprobung von neuen Bahntechnologien. Dieses „Digitale Testfeld Erzgebirge“ erstreckt sich zwischen Schwarzenberg und Annaberg-Buchholz über eine Länge von 24 km durch eine hügelige Landschaft.

Auf der Strecke (Streckenummer 6624) finden seit längerer Zeit keine regulären Zugfahrten mehr statt. Nichtsdestotrotz kann die in Stand gehaltene Teststrecke für neue Bahnapplikationen (etwa für automatisiertes Fahren, Videoübertragungen, digitale Karten, Zugdiagnostik etc.) genutzt werden.

Einen landschaftlichen Höhepunkt bildet das Markersbacher Viadukt – ein über 30 m hohes und 200 m langes Gerüstpfelerviadukt nahe dem Ort Markersbach (Bild 1). Die Strecke hat einige Anstiege und unbeschränkte Bahnübergänge und kann mit Höchstgeschwindigkeiten von nur 40-80 km/h befahren werden. Für die Erprobung von 5G / FRMCS wurden auf einem 10 km langen Teilstück der Strecke (zwischen Markersbach und Schlettau) acht Mobilfunkstandorte errichtet (Bild 2). Die Masten sind 10 m hoch. Eine Ausnahme bildet der Bahnhof Scheibenberg, dort ist auf dem Dach des Bahnhofsgebäudes eine Antenne in Höhe von

located in the Erzgebirge. Both solutions are based on the current 3GPP Release 16 mobile radio standard. DB Netz has provided the test field, including the infrastructure, as part of the DSD sector initiative. A total of eight radio sites along a 10 km railway line, fibre optic connections and a central server infrastructure site in the lab at Scheibenberg station form the 5G test network.

The test environment was successfully set up and commissioned during the first project phase. The following is an overview of the architecture, the tests carried out to date and the relevant findings.

2 Description of the test setup

2.1 Description of the test field

DB Netz operates a test field in the Erzgebirge in cooperation with the Erzgebirgsbahn to test new railway technologies. The Digital Rail Testbed in Germany's Erzgebirge stretches between Schwarzenberg and Annaberg-Buchholz over a length of 24 km through a hilly, rural landscape.

There have been no regular train services on the line (line number 6624) for quite some time. Nevertheless, the line has been maintained and can be used as a test track for new railway applications (e.g. automated driving, video transmissions, digital maps, train diagnostics, etc.).

The Markersbach Viaduct, a scaffold pier viaduct that is over 30 metres high and 200 metres long, is a scenic highlight on the line located near the village of Markersbach (fig. 1). The route has several ascents and ungated level crossings and can be travelled at maximum speeds of only 40-80 km/h.

Eight mobile radio sites have been erected on the 10 km section of the line (between Markersbach and Schlettau) for testing 5G / FRMCS (fig. 3). The antennas are mounted on 10 m high masts. One exception is Scheibenberg, where the antenna is mounted on the roof of the railway station building at a height of almost



Bild 1: Markersbacher Viadukt mit dem advanced TrainLab, dem Labor- und Testzug der DB

Fig. 1: The Markersbach Viaduct with the advanced TrainLab, DB's laboratory and test train

Quelle / Source: DB Netz

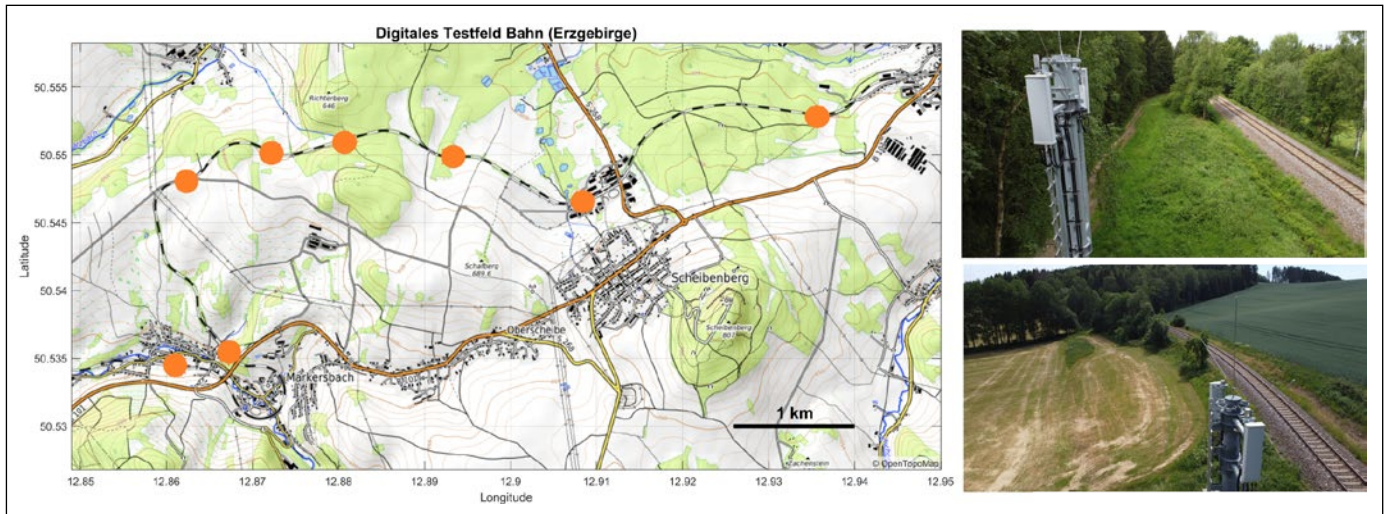


Bild 2: Topographischer Überblick über die Teststrecke (Antennenstandorte orange markiert) und beispielhafte Fotos des Streckenverlaufs
 Fig. 2: A topographical overview of the test route (the antenna locations are marked in orange) and exemplary photos of the route
 Quelle / Source: DB Netz

knapp 14 m montiert. Das ehemalige Bahnhofsgelände in Scheibenberg wird aktuell zum zentralen Standort des Digitalen Testfeldes ausgebaut; hier entstehen nicht nur Schulungsräume, sondern auch Räumlichkeiten für die IT-Infrastruktur. Alle Mobilfunkstandorte sind über Glasfaserleitungen mit dem Bahnhof Scheibenberg verbunden, wo auch der Core des 5G-Netzes untergebracht ist.

2.2 Beschreibung des 5G-Systems im Digitalen Testfeld Bahn

Nokia als Partner für Design und Implementierung des Kommunikationsnetzes setzt in der Realisierung auf folgende 5G Stand-Alone (SA)-Architektur (Bild 3): Die Nokia Compact Mobility Unit (CMU) fungiert als 5G Core. Sie läuft auf zwei redundanten HP-Rack-Servern und stellt die notwendigen Core-Funktionen und Schnittstellen bereit. Im Radio-Bereich kommen Produkte der Nokia Airscale-Familie zum Einsatz. Diese bestehen aus zwei modular erweiterbaren Baseband-Units (BBU), an denen die an den acht Funkstandorten montierten Remote Radio Heads (RRH) angebun-

14 metres. The former railway station in Scheibenberg is currently being developed into the central location for the Digital Test Field. Training rooms and premises for the IT infrastructure are being built here. Fibre optic lines connect all the mobile radio sites with Scheibenberg station, which also houses the core of the 5G network.

2.2 Description of the 5G system at the Digital Rail Testbed

As a partner for the design and implementation of the communication network, Nokia has relied on the following 5G stand-alone (SA) architecture (fig. 3): the Nokia Compact Mobility Unit (CMU) acts as the 5G core. It runs on two redundant HP rack servers and provides the necessary core functions and interfaces. Products from the Nokia Airscale family have been used in the radio area. These consist of two modularly expandable baseband units (BBUs), to which the remote radio heads (RRHs) installed at the eight radio sites are connected. Each RRH serves two four-port antennas at 3700 MHz. Both

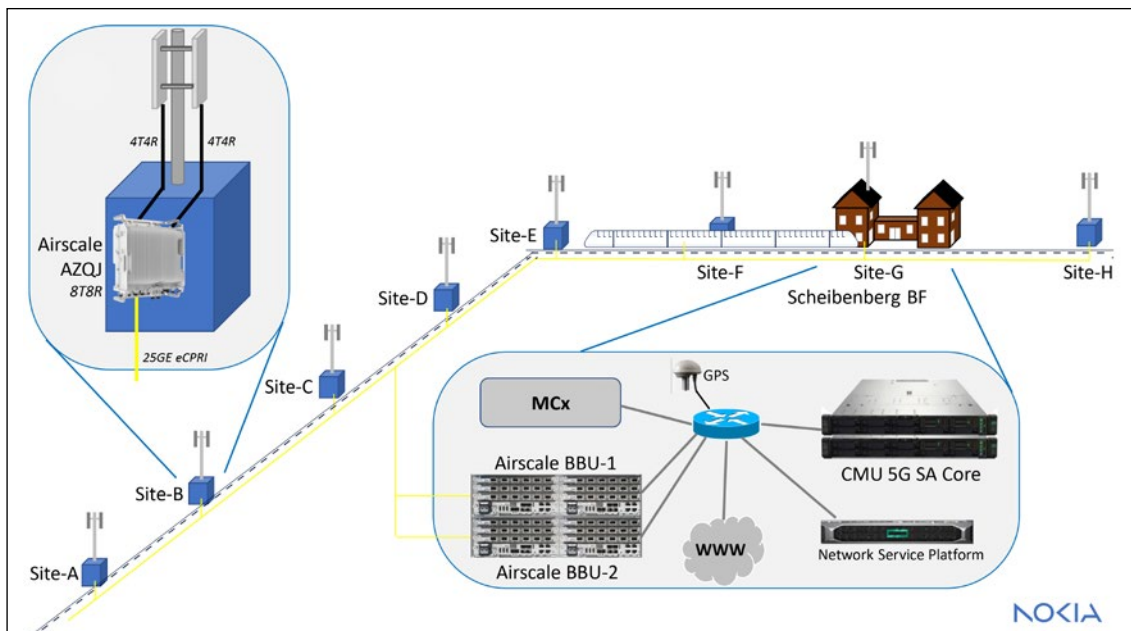


Bild 3: Schematischer Aufbau des Nokia 5G-Systems im DTB Erzgebirge

Fig. 3: The schematic structure of the Nokia 5G system at the Erzgebirge DTB
 Quelle / Source: Nokia

den sind. Jeder RRH bedient hierbei zwei vier-Port Antennen bei 3700 MHz. Zur Feinjustierung der Abstrahlrichtung sind beide einzeln per Remote Electrical Tilt (RET) einstellbar. Die Verschaltung aller Komponenten über ein IP/MPLS Transportnetz erfolgt durch Interconnect-Router des Typs Nokia 7250 IXR-e. Diese Router ermöglichen die Einspeisung der für den Betrieb notwendigen Synchronisation über ein GPS-Signal, die Verbindung zum MCx-System und allen anderen Testservern, Zugriffspunkten und Service-Terminals. Über eine gesicherte Verbindung besteht Zugang zu lokalem WiFi und dem Internet, welches eine komplette Überwachung, Steuerung und Konfiguration des Systems durch Nokia und die Partner per Fernüberwachung ermöglicht. Zur Unterstützung zukünftiger Testkampagnen wurde zusätzlich eine Monitoring-Plattform (Nokia Network Service Plattform (NSP)) installiert. Die Analytics Software ermöglicht eine optimale Auswertung der Leistungs- und Messergebnisse.

Zur Erprobung von Applikationen und Funktionen auf FRMCS Prototyp-Basis wurde darauffolgend das MCx-System von Kontron ohne größere Aufwände in Bezug auf Konzept, Netzwerkdesign und Schnittstellen mit dem Nokia 5G-System zeitgerecht integriert.

2.3 Beschreibung des MCx-Systems im Digitalen Testfeld Bahn

Kontron stellt im Test-Setup das MCx-Track-Site-System zur Verfügung (Bild 4). Es umfasst ein konvergentes, IP Multimedia Subsystem (IMS) -basiertes, virtualisiertes und 3GPP-konformes System, das in der Lage ist, Endnutzern unternehmenskritische Ende-zu-Ende-Dienste bereitzustellen. Es bietet offene und standardisierte Schnittstellen, um ein Höchstmaß an Interoperabilität zu ermöglichen. Der Testaufbau besteht aus einem im Bahnhof Scheibenberg installierten Kontron-Server, auf dem der IMS-basierte Session Initiation Protocol (SIP)-Core und die Mission Critical (MC)-Service-Applikationsserver laufen, eine Dispatcher-Applikation, die auf einem Laptop läuft, und mehrere MC Service UE, welche MC Service Clients beinhalten.

Die funktionalen Einheiten der MCx-Lösung sind voneinander getrennt und auf mehreren virtuellen Maschinen auf einer kleinen Rechenzentrumsinfrastruktur installiert.

Folgenden Funktionen sind zur Bereitstellung von MC Services im MCx-System integriert:

are individually adjustable via Remote Electrical Tilt (RET) for fine tuning the radiation direction. All the components are interconnected via an IP/MPLS transport network using Nokia 7250 IXR-e interconnect routers. These routers enable the provision of the synchronisation that is necessary for operations via a GPS signal, the connection to the MCx system and all the other test servers, access points and service terminals. There is access to local WiFi and the internet via a secure connection, which allows the complete remote monitoring, control and configuration of the system by Nokia and its partners. A monitoring platform (the Nokia Network Service Platform (NSP)) has also been installed to support future test campaigns. The analytics software enables the optimal evaluation of the performance and measurement results.

Kontron's MCx system was subsequently integrated with the Nokia 5G system without any major efforts in terms of the concept, network design and interfaces in order to test the applications and functions based on the FRMCS prototype.

2.3 Description of the MCx system at the Digital Rail Testbed

Kontron provided the MCx track site system in the test setup. It comprises a converged, virtualised and 3GPP-compliant system based on the IP Multimedia Subsystem (IMS) that is capable of delivering mission-critical end-to-end services to end users. It provides open and standardised interfaces to enable maximum interoperability. The test setup consists of a Kontron server installed at Scheibenberg station running the IMS-based Session Initiation Protocol (SIP) core and the Mission Critical (MC) service application servers, a dispatcher application running on a laptop and several MC service UEs containing MC service clients.

The functional units of the MCx solution are separated from each other and installed on several virtual machines in a small data centre infrastructure.

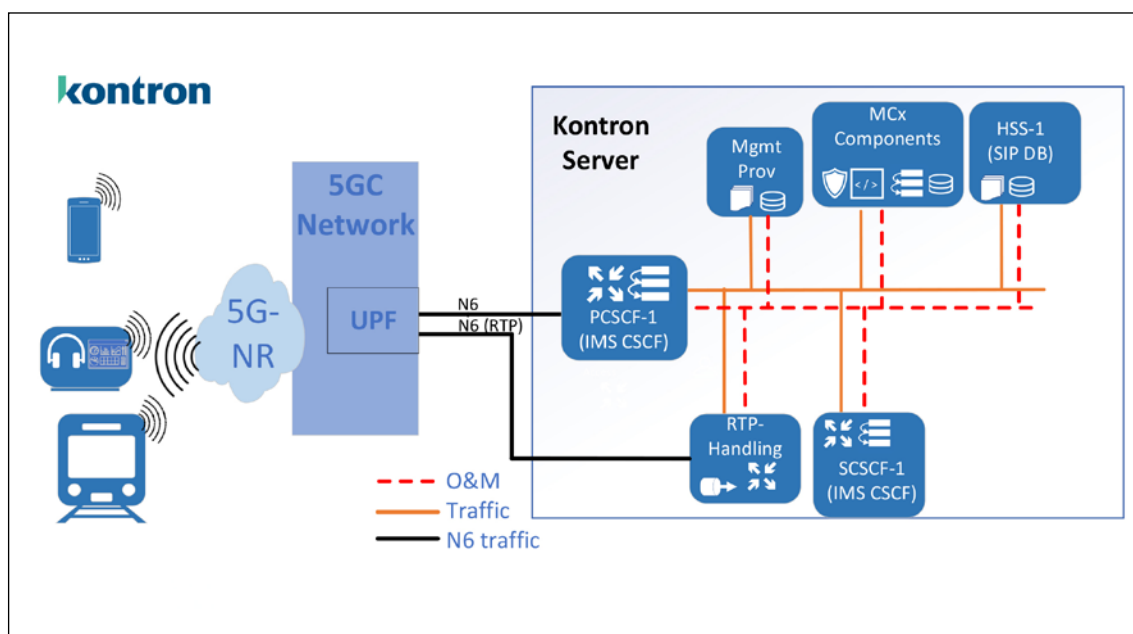
The following functions have been integrated into the MCx system to provide MC services:

- FRMCS-specific functions
- general MCx services, such as terminal authorisation, user authentication, registration, configuration and security

Bild 4: Kontron MCx-System mit der Anbindung an den 5G Core

Figure 4: The Kontron MCx system with a connection to the 5G core

Quelle / Source: Kontron



- FRMCS-spezifische Funktionen
- allgemeine MCx-Dienste, wie Terminalautorisierung, Benutzerauthentifizierung, Registrierung, Konfiguration und Sicherheit
- die Funktionen für Verteilung von Daten und Konferenzen
- die logischen Anwendungsserver-Funktionen: MCPTT-Server für private (Punkt-zu-Punkt-) Gespräche und Gruppenkommunikation, MCDATA-Server für IPConn-, Messaging- und Dateiverteilungsdienste, MCVideo-Server für Videokommunikationsdienste (geplant), Floor Control (FC)-Server
- der IMS-basierte SIP-Core.

Der IMS-basierte SIP-Core bietet die Möglichkeit, intelligente Applikations-Server (AS) einzubinden, um zusätzliche Dienste an das IMS-Netz anzuschließen. Es umfasst die folgenden Hauptfunktionen:

- SIP-Registrator zum UE
- SIP-Proxy
- Dienstausswahl
- Sicherheit an der Gm-Schnittstelle.

3 Tests und Ergebnisse

3.1 Testausrüstung und Methoden

Die Feldversuche und Testkampagnen wurden mit dem DB-eigenen Testzug „advanced TrainLab“ (einem ICE der Baureihe 605) und einem RF-Messwagen (Pkw-Kleintransporter) der DSD durchgeführt (Bild 5). Dieser Kleintransporter kann für stationäre oder mobile Szenarien entlang der Schienenwege eingesetzt oder auf einer speziellen Güterwagen-Plattform (ROLA) direkt auf der Strecke bewegt werden. Beide Fahrzeuge wurden mit einer Antennenhalterung auf dem Dach ausgestattet, die diverse Multiple-Input and Multiple-Output (MIMO)-Bahnantennen aufnehmen kann.

Die Messplattform ist flexibel für den Wechsel der Antenne auf dem Dach einsetzbar, je nach Bedarf und Testumfang. Die meisten Tests der Testkampagne wurden mit passiven Antennen mit unterschiedlicher Anzahl von vertikal polarisierten Strahlern durchgeführt, z.B. 1-Port-, 2-Port- oder 4-Port-Typen. Das Messsystem kann stationär oder in den Versuchsfahrzeugen eingesetzt werden und beinhaltet einen Kontroll-PC mit Messsoftware, vier Fahrnetzscannern, GPS-Empfänger und vorkonfiguriertem UE (User Equipment) zur Datenübertragung im SA-Mobilfunknetz. Die Fahrversuche waren so geplant, dass die aufgezeichneten Daten mit unterschiedlichen Konfigurationen verglichen werden konnten. Nach der Durchführung der Tests wurden die Messdaten konvertiert und zur Nachbearbeitung und grafischen Darstellung weiterbearbeitet. Als Modem wurde das

- data distribution and conference functions
- the logical application server functions: an MCPTT server for private (point-to-point calls) and group communication, an MCDATA server for IPConn, messaging and file distribution services, an MCVideo server for video communication services (planned) and a Floor Control (FC) server.

- The IMS-based SIP Core.

The IMS-based SIP Core offers the option of including intelligent application servers (AS) to connect additional services to the IMS network. This includes the following main functions:

- SIP Registrar to the UE
- SIP proxy
- Service selection
- Safety at the Gm interface.

3 Tests and results

3.1 Test equipment and methods

The field tests and test campaigns were carried out using DB's own "advanced TrainLab" test train (an ICE from the 605 series) and a DSD RF test van (fig. 5). This transporter can be used for stationary or mobile scenarios along the tracks or moved directly onto the track on a special freight car platform (ROLA). Both vehicles are equipped with an antenna mount on the roof that can accommodate various multiple-input and multiple-output (MIMO) railway antennas.

The measurement platform allows the antenna on the roof to be flexibly changed depending on the requirements and the scope of the test. Most of the tests in the test campaign were carried out using passive antennas with different numbers of vertically polarised radiators, e.g. 1-port, 2-port or 4-port types. The measurement system can be used when stationary or in the test vehicles and includes a control PC with measurement software, four driving network scanners, a GPS receiver and pre-configured UE (User Equipment) for data transmissions in the SA mobile network. The driving tests were planned in such a way that the recorded data could be compared with different configurations. Once the tests had been carried out, the measured data was converted and further processed for post-processing and graphic presentation. The used modem was a Quectel RM500Q module on an evaluation board to check the coverage on the track or to measure the network throughput and KPIs (Key Performance Indicators) within different network configurations.

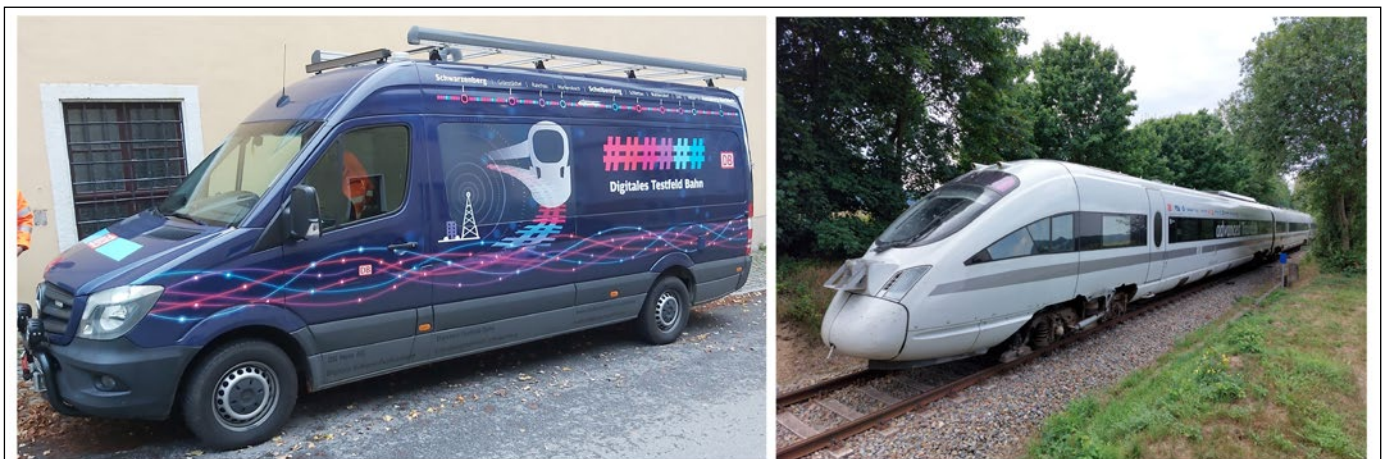


Bild 5: DSD-Messwagen und advanced TrainLab

Fig. 5: The DSD measurement van and advanced Train Lab

Quelle / Source: DB

Quectel RM500Q-Modul auf einem Evaluation-Board verwendet, um die Abdeckung auf der Strecke zu überprüfen oder den Netzwerkdurchsatz und die KPI (Key Performance Indicators) innerhalb verschiedener Netzwerkkonfigurationen zu messen.

Die MCx-Funktionen wurden mit den ersten Prototypen von FRMCS-fähigen Zugfunkgeräten und Mobiltelefonen durchgeführt, welche durch die Projektpartner bereitgestellt wurden.

3.2 5G-Tests und Ergebnisse

Die Auswertung der verfügbaren Messergebnisse ergab trotz des herausfordernden Test-Setups die zu erwartende Netzausbreitung und Bandbreite bei 3,7 GHz. Herausfordernd waren in puncto „5G Radio“ besonders die vorgegebenen Rahmenbedingungen von nur 10 m hohen Antennenmasten gekoppelt mit den geographischen Gegebenheiten einer kurvenreichen Streckenführung in einer bewaldeten, hügeligen Landschaft. Bei den vier bisher durchgeführten Messkampagnen kam ein von Rohde & Schwarz speziell hierfür entwickeltes 5G-Messsystem erfolgreich zum Einsatz.

Für FRMCS wird MIMO und insbesondere MIMO-Antennen-Feature die 5G-Radio-Leistung verbessern, was auch in den durchgeführten MIMO-Konfigurationstests sichtbar geworden ist. Die Tests wurden mit zwei unterschiedlichen MIMO-Konfigurationen durchgeführt:

- 4x2 DL MIMO + 2x2 UL MIMO; zwei Antennen in einer gemeinsamen Funkzelle pro Standort
- 2x2 DL MIMO + 2x2 UL MIMO; zwei Antennen in zwei getrennten Funkzellen pro Standort.

Dabei konnte mit der ersten Konfiguration eine höhere Performance (Datenrate) erzielt werden.

Die Analyse der Radio Ressource Allocation ergab in diesem Testumfeld eine bessere Leistung bei der Verwendung von Long-PUCCH, vor allem im Uplink. Dagegen ergab der Vergleich von Open-Loop zu Closed-Loop (ohne die Möglichkeit von höheren Zuggeschwindigkeiten) keinerlei nennenswerte Unterschiede, was durch die geringe Geschwindigkeit während der Messungen verursacht sein kann. Long/Short-PUCCH und Closed/Open Loop sind verschiedene Methoden, um die Signalstärke zwischen Endgerät und Antenne spezifisch zu steuern.

Zugseitig haben die Partner Siemens Mobility und Funkwerk erfolgreich ihre Modems in das Nokia 5G SA-System eingebunden, wobei die zu erzielenden Werte aus den statischen Tests auch im dynamischen Fahrbetrieb erreicht werden konnten.

3.3 MCx-Tests und Ergebnisse

In der Testreihe wurde versucht, verschiedene bahnbetriebliche Szenarien abzudecken. Speziell wurde darauf geachtet, in den Testszenerarien immer das Gesamtsystem aus MCx- und 5G-Komponenten zu verwenden, um die Ergebnisse auch im Kontext des Gesamtsystems zu erhalten. Die Bewertung von Funktions- sowie Qualitätsparametern im MCx-System stand im Focus der MCx relevanten Tests.

Folgende Betriebsszenarien wurden definiert:

- Zugfunk: Punkt-zu-Punkt und Gruppenrufe über MCPTT
- Datendienste (für z. B. ETCS, ATO) über MCData

Einige der getesteten Szenarien für MCPTT Rufe sind im Folgenden angeführt:

- On-Demand Private MCPTT Anruf
- Floor Management während eines Gruppenrufs: Auswirkung der Priorität des Benutzers
- Upgrade eines laufenden MCPTT-Gruppenrufs auf eine höhere Priorität

The MCx functions were performed with the first prototypes of FRMCS enabled train radios and mobile phones provided by the project partners.

3.2 5G tests and results

Despite the challenging test setup, an evaluation of the available measured results yielded the expected network propagation and bandwidth at 3.7 GHz. The specified general conditions pertaining to the antenna masts that were only 10 metres high coupled with the geographical conditions of the winding route in a wooded, hilly landscape were particularly challenging in terms of “5G radio”. A 5G measurement system specially developed by Rohde & Schwarz has been successfully used in the four measurement campaigns carried out to date.

MIMO and MIMO antenna feature in particular will improve the 5G radio performance for FRMCS, which was also apparent in the conducted MIMO configuration tests. The tests were conducted using two different MIMO configurations:

- 4x2 DL MIMO + 2x2 UL MIMO; two antennas in a common radio cell per site
- 2x2 DL MIMO + 2x2 UL MIMO; two antennas in two separate radio cells per site.

A higher performance (in data rate) was achieved with the first configuration.

The analysis of the radio resource allocation showed a better performance in this test environment when using Long-PUCCH, especially in the uplink. By contrast, a comparison of open-loop and closed-loop (without the possibility of higher train speeds) did not show any significant differences, which may have been caused by the low speeds during the measurements. Long/short PUCCH and closed/open loop are different methods used to specifically control the signal strength between terminal and antenna.

On the train side, the partners Siemens Mobility and Funkwerk successfully integrated their modems into the Nokia 5G SA system, whereby the values achieved from the static tests were also able to be realised in dynamic driving operations.

3.3 MCx tests and results

An attempt was made to cover various railway operating scenarios in the test campaigns. Special care was taken to always use a complete system of all the MCx and 5G components in the test scenarios in order to obtain results within the context of the overall system. The evaluation of the function and quality parameters in the MCx system was the focus of the MCx-relevant tests.

The following operating scenarios were defined:

- Train radio: point-to-point and group calls via MCPTT
- Data services (for e.g. ETCS, ATO) via MCData

Some of the tested scenarios for MCPTT calls are listed below:

- an On-Demand Private MCPTT Call
- floor management during a group call: the effect of the user's priority
- upgrading an ongoing MCPTT group call to a higher priority
- a location message from an MCPTT user to the MCx-AS
- the effect on the system bandwidth when using different codecs, e.g. AMR-WB, G.711 a-Law.

An analysis of both the signalling traffic and the RTP data stream was carried out. The completeness of the various MCx procedures was analysed and evaluated as part of the SIP flow analysis:

- registration, deregistration, affiliation

- Standortmeldung vom MCPTT-Benutzer an den MCx-AS
- Auswirkung auf die Systembandbreite bei Verwendung verschiedener Codecs, z. B. AMR-WB, G.711 a-Law.

Es wurde sowohl eine Analyse des Signalisierungsverkehrs als auch des RTP-Datenstroms durchgeführt. Im Rahmen der SIP-Flow-Analyse wurde die Vollständigkeit der verschiedenen MCx-Prozeduren analysiert und bewertet:

- Registrierung, Abmeldung, Affiliation
- Verbindungsaufbau, Verbindungsaufbauzeit und Verbindungsabbau.

Im Rahmen der RTP-Analyse wurden die folgenden KPI und Indikatoren analysiert (als Stream-by-Stream-Analyse, kombinierte Streams pro Anruf):

- Dauer des Anrufs
- Anzahl der Pakete, verlorene Pakete in %
- minimale, durchschnittliche und maximale Verzögerung in Millisekunden
- minimaler, durchschnittlicher und maximaler Jitter
- Auswirkungen aufgrund des Verhaltens des 5G-Netzes, wie Zellenwechsel (Handover-Verfahren), Verlust der Abdeckung oder schlechte Abdeckung.

Als Beispiel sei die Auswertung des Packet Delay der RTP-Pakete eines MCx-Sprachrufes über das 5G-Transportnetz in Bild 6 dargestellt.

Des Weiteren wurden auch Datendienste getestet, wie MC Data SDS (Short Data Service), MCDData File Distribution (Datei-Übertragung), MCDData IP Connectivity (IPCon). MCDData IPCon ist von besonderem Interesse, da viele zukünftigen Bahnanwendungen über MCDData IPCon bedient werden sollen.

3.4 Schlussfolgerungen

Die Tests im 5G-basierten Transport Stratum zielten auf die Vermessung und Optimierung von Abdeckung und Durchsatz auf der Teststrecke. Dabei ergab sich, dass die anspruchsvolle Topografie im Erzgebirge, das genutzte Frequenzband bei 3,7 GHz und die Antennenhöhe von nur 10 m bei den bisher genutzten Antennenstandorten zu Lücken in der Ausleuchtung führen. Bei Tests verschiedener zugeseitiger Modems konnten dabei Probleme bei der De-/Registrierung im Netz gefunden und behoben werden. Durch eine Verbesserung der Abdeckung durch MIMO-Antennenfeatures und eine Anpassung der Antennenstandorte könnte per-

- connection setup, connection setup time and connection termination.

The following KPIs and indicators were analysed as part of the RTP analysis (as stream-by-stream analysis, combined streams per call):

- call duration
- number of parcels, lost parcels in %
- minimum, average and maximum delay in milliseconds,
- minimum, average and maximum jitter
- impacts due to the behaviour of the 5G network, such as cell changes (handover procedures), loss of coverage or poor coverage.

As an example, the evaluation of the packet delay of the RTP packets for an MCx voice call via the 5G transport network is shown in fig. 6.

Furthermore, data services such as MC Data SDS (Short Data Service), MCDData File Distribution (file transfer) and MCDData IP Connectivity (IPCon) were also tested. MCDData IPCon is of particular interest, as many future railway applications will be operated using MCDData IPCon.

3.4 Conclusions

The tests in the 5G-based transport stratum were aimed at measuring and optimising the coverage and throughput on the test track. It has been found that the challenging topography in the Erzgebirge, the used frequency band of 3.7 GHz and the antenna height of only 10 meters have led to gaps in coverage at the antenna locations used so far. Problems with de-/registration in the network were found and solved during tests of the various train-side modems. The coverage could be perspectivevely improved through the use of MIMO antenna features and the adaptation of the antenna locations. On the other hand, an improvement in radio coverage could also be expected by using the bands designated for FRMCS in the 900 MHz and 1.9 GHz bands (tests at 900/1900 MHz are currently not possible due to the current unavailability of some technical components).

The MCx section focussed on the integration of the MCx system into the 5G network and the performance of the end-to-end verification of the MCx service layer. This was tested using different types of UE such as the MCx client on 5G devices, on-board devices and dispatcher applications. Key test scenarios for critical

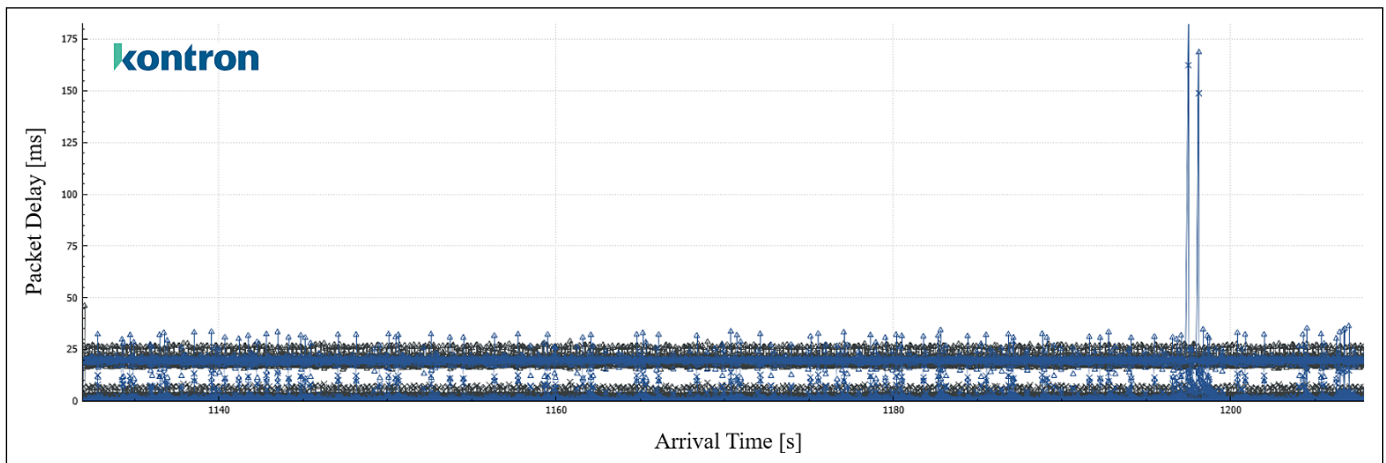


Bild 6: Packet Delay eines MCx-Sprachrufes; die Signallaufzeit der Pakete (dargestellt als blaue Punkte über die Zeit) ist <50 ms, mit einer Ausnahme während eines Handovers zwischen zwei Antennen in einem Funkloch.

Fig. 6: The packet delay of an MCx voice call; the signal delay of the packets (shown as blue dots over the test time) is <50 ms with the exception of the handover between two antennas in a coverage gap.

Quelle / Source: Kontron

spektivisch die Abdeckung verbessert werden. Andererseits wäre durch Nutzung der für FRMCS vorgesehenen Bänder in 900 MHz und 1,9 GHz auch eine verbesserte Radioabdeckung zu erwarten (aktuell sind Tests in 900/1900 MHz mangels geeigneter technischer Komponenten noch nicht möglich).

Der Fokus im MCx-Teil lag auf der Integration des MCx-Systems in das 5G Netz sowie eine Ende-zu-Ende-Verifizierung des MCx Service Layers. Dies wurde mit verschiedenen Endgerätetypen wie MCx Client auf 5G Devices, On-Board-Geräten und Dispatcher-Anwendungen getestet. Dabei wurden erfolgreich wesentliche Testzenarien für kritische Dienste im Bahnumfeld wie hochprioritäre Sprachrufe, Gruppenrufe sowie auch Datendienste ausgeführt und dokumentiert. Des Weiteren wurden KPI getestet, um die Leistungsmerkmale der Dienste objektiv bewerten zu können. Die grundsätzliche Eignung eines Ende-zu-Ende MCx-Systems über ein 5G-Netz für betriebskritische Anwendungen konnte mit den Funktionstests verifiziert werden.

Nach unserem Wissen ist mit der Installation im Digitalen Testfeld Erzgebirge ein erster erfolgreicher Aufbau eines (prä-standard) FRMCS-Systems im Feld realisiert worden. Dieses soll für weitere Erprobungen bereitstehen und entsprechend der neuen Anforderungen weiter ausgebaut werden.

4 Ausblick

Da die Tests im MCx Service Stratum teilweise durch noch fehlende Detailspezifikation in den relevanten Standards auf ein initiales Set von Use Cases ausgerichtet waren, sollen im Testfeld zukünftig weitere Funktionalitäten im engen Austausch mit der Standardisierungsarbeit ergänzt und erprobt werden.

Das 5G Transport Stratum soll perspektivisch mit fortschrittlicheren und leistungsfähigeren Komponenten im 5G Core und Radio aktualisiert werden, um auch in den nächsten Jahren ein modernes Mobilfunknetz als Grundlage für die FRMCS-Testumgebung nutzen zu können.

Bis Ende 2026 sollen im Testfeld weitere Anwendungen (etwa für hochautomatisiertes Fahren oder Fahren im Bremswegabstand) und F&E-Projekte (bspw. 5GRail und 5G-RACOM) mit verschiedenen Aspekten und Funktionalitäten erprobt werden. Dabei soll besonderer Fokus auf der weiteren Entwicklung von FRMCS selbst liegen, und es sollen dabei relevante Erkenntnisse für die Standardisierung, Implementierung und perspektivisch den Rollout des neuen Bahnfunksystems gesammelt werden. Gleichzeitig soll die FRMCS-Testumgebung auch zukünftigen bahnbetrieblichen Applikationen eine Erprobung auf Grundlage von FRMCS ermöglichen. ■

services in the railway environment such as high-priority voice calls, group calls and data services were successfully executed and documented. Furthermore, KPIs were tested in order to objectively evaluate the services' performance characteristics. The functional tests verified the basic suitability of an end-to-end MCx system over a 5G network for mission-critical applications. To the best of our knowledge, the installation at the Erzgebirge Digital Test Field represents the first successful set-up of a (pre-standard) FRMCS system in the field. This should be ready for further testing and expanded according to new requirements.

4 Outlook

Since the tests in the MCx service stratum were partly oriented towards an initial set of use cases due to the lack of detailed specifications in the relevant standards, further functionalities should be added and tested in the test field in the future in a close exchange with the standardisation work.

The 5G transport stratum is to be updated with more advanced and more powerful components in the 5G core and radio in the future in order to enable the use of a modern mobile radio network as the basis for the FRMCS test environment in the coming years.

Further applications (e.g. for highly automated driving or driving at a braking distance) and projects (e.g. 5GRail and 5G-RACOM) will test various aspects and functionalities at the test field until the end of 2026. Special focus will be placed on the further development of FRMCS itself and relevant findings will be collected for the standardisation, implementation and, in the long term, the rollout of the new railway radio system. At the same time, the FRMCS test environment should also enable future railway applications to be tested on the basis of FRMCS. ■

AUTOREN | AUTHORS

Jan Koernicke

Project Manager 5G & Cloud
Digitale Schiene Deutschland / DB Netz AG
Anschrift / Address: Stresemannstraße 123A, D-10963 Berlin
E-Mail: jan.koernicke@deutschebahn.com

Maksym Tyrsykk

Field Test Engineer Digitale Schiene Deutschland
Digitale Schiene Deutschland / DB Netz AG
Anschrift / Address: Stresemannstraße 123A, D-10963 Berlin
E-Mail: maksym.tyrsykk@deutschebahn.com

Christian Schwass

Solution Manager GSMR & FRMCS
Nokia Solutions and Networks GmbH & Co KG
Anschrift / Address: Hansaallee 299, D-40549 Düsseldorf
E-Mail: christian.schwass@nokia.com

Manfred Taferner

Mission Critical Networks, Architecture
Kontron Transportation GmbH
Anschrift / Address: Lehrbachgasse 11, A-1120 Wien
E-Mail: manfred.taferner@kontron.com