

Innovative Antennentechnologien für FRMCS – Feldstudie bei 1,9 GHz

Innovative antenna systems for FRMCS – field trials at 1.9 GHz

Bernd Hoffeld | Simon Biemond | Lourdes Garcia | Said Mehira

Das Future Railway Mobile Communication System (FRMCS) wird der Nachfolger von GSM-R. Es wird auf 5G-Technologien basieren und die bahnbetriebliche Funkkommunikation verbessern. Dabei ermöglichen weiterentwickelte Funkzugangszugangsnetz- und Kernnetzarchitekturen sowie innovative Antennensysteme in FRMCS höhere Bitraten, geringere Latenzen und hohe Zuverlässigkeit für die zukünftigen Datenübertragungen im Rahmen der Digitalisierung und Automatisierung des Bahnbetriebs. Dieser Beitrag legt den Schwerpunkt auf Mehrantennen-Funktechnologien und deren Vorteile für FRMCS-Netze bei 1,9 GHz. Vorgestellt wird ein Erprobungsprojekt, welches gemeinsam von der DB Netz AG und DB Erzgebirgsbahn, Ericsson und Rohde & Schwarz im Rahmen der Sektorinitiative „Digitale Schiene Deutschland“ (DSD) durchgeführt wurde.

1 FRMCS-basierte Konnektivität für den digitalen Bahnbetrieb

Die Sektorinitiative DSD nutzt konsequent die Chance der Digitalisierung und Automatisierung, um die Leistungsfähigkeit der Eisenbahn zu steigern. Dazu müssen zahlreiche neue Technologien im Bahnsystem Einzug halten [1]. Das Fundament dafür wird mit der grundlegenden Modernisierung der Infrastruktur durch die Einführung des Europäischen Zugbeeinflussungssystems (European Train Control System, ETCS) und digitaler Stellwerkssysteme (DSTW) gelegt sowie dem hochautomatisierten Fahren gemäß Grade of Automation 2 (GoA2). Darüber hinaus arbeitet DSD an einer weitreichenderen Digitalisierung des Bahnbetriebs, die bspw. ein auf Künstlicher Intelligenz (KI) basierendes Verkehrs- und Störfallmanagement und verringerte Zugfolgezeiten aufgrund der „Moving Block“-Logik mit ETCS Level 3 umfasst. Auch ein vollautomatisierter Zugbetrieb gemäß GoA4 in Verbindung mit einer hochpräzisen Echtzeitlokalisierung von Zügen und modernster Fahrzeugsensorik zur Umfeld- und automatisierten Störfallwahrnehmung ist fester Bestandteil des Zielbildes von DSD. Insgesamt werden damit die Kapazität, die Pünktlichkeit und die Effizienz des Bahnbetriebs signifikant verbessert. Dies ist dringend notwendig für mehr Verkehr auf der Schiene und um die Bahn als klimafreundlichsten Verkehrsträger zu stärken. Die Integration neuer, digitaler Technologien geht mit anspruchsvolleren Anforderungen an die Datenkommunikation einher. Deswegen müssen neue Konnektivitäts- und IT-Plattformen geschaffen werden, wie z. B. FRMCS [2] für eine hochleistungsfähige und drahtlose Echtzeitkommunikation zwischen Zügen und Infrastruktur. Mobilfunktechnologien der nächsten Generation wie 5G werden die Grundlage für ein effizientes und flexibles FRMCS bilden [3, 4]. Sie werden das derzeitige 2G-basierte GSM-R System, das künfti-

The Future Railway Mobile Communication System (FRMCS) will be the successor to GSM-R. It will be based on 5G technologies and will enhance mobile train-to-ground communications in rail operations. Improved radio access and core network architectures as well as innovative antenna systems in FRMCS will enable higher transmission rates, lower latencies and high reliability for any future data transfers within the scope of the digitalisation and automation of railway services. This article focuses on multi-antenna radio technologies and their benefits for FRMCS networks at 1.9 GHz. It presents a field trial project which has been jointly undertaken by DB Netz AG and DB Erzgebirgsbahn, Ericsson and Rohde & Schwarz under the “Digitale Schiene Deutschland” (DSD) sector initiative.

1 FRMCS-based connectivity for digital rail operations

The DSD digital rail program is concerned with taking rail operations to a new level by introducing next-generation technologies to enable automation and digitalisation for improved railway performance [1]. The foundation of this process will be laid by the fundamental modernisation of the infrastructure involving the introduction of the European Train Control System (ETCS) and digital interlocking systems as new control and safety technology as well as the highly automated driving according to Grade of Automation 2 (GoA2). In addition, DSD is working on the far-reaching digitalisation of rail operations encompassing, for example, an Artificial Intelligence (AI) based traffic and incident management system, an ETCS Level 3 moving block approach, fully automatic train operations in accordance with GoA4 combined with high-precision real time train localisation and the latest vehicle sensor technology for environmental and automated incidence perception. Overall, this technological leap will significantly improve the capacity, reliability and efficiency of rail operations, all of which are necessary for increasing rail transportation and strengthening the railway as the carbon-neutral mode of transportation of the future. New connectivity and IT platforms, such as the FRMCS [2] for high performance, real-time wireless communication between trains and infrastructure, have to be established in order for the advanced operating technologies to be implemented. Next generation mobile communication technologies such as 5G will constitute the basis for a powerful and flexible FRMCS [3, 4]. They will initially complement and eventually replace the currently run-

ge Konnektivitätsanforderungen des digitalen Bahnsystems nicht erfüllen kann, zunächst ergänzen und schließlich ersetzen [5].

Im Vergleich zum heutigen Bahnbetrieb führen die neuen Anwendungsfälle zu erheblich höheren Anforderungen an die Konnektivität. Bspw. wird die durchschnittlich erforderliche Datenrate pro Zug um zwei Größenordnungen auf mehrere Mbit/s pro Zug ansteigen. Gleichzeitig wird die Zahl der im Netz verkehrenden Züge steigen. Auch die Anforderungen an die Latenzzeit werden anspruchsvoller, wobei einige Anwendungsfälle, insbesondere im Zusammenhang mit dem vollautomatisierten Fahren, Ende-zu-Ende (E2E) Latenzen von ca. 10 ms erfordern [6].

Die führenden europäischen Bahnen und die Industrie arbeiten eng zusammen, um FRMCS in den Standardisierungsgruppen von UIC (International Union of Railways), ETSI (European Telecommunications Standards Institute) und 3GPP (3rd Generation Partnership Project) zu spezifizieren, während ECC CEPT (Electronic Communications Committee in the European Conference of Postal and Telecommunications Administration) die Frequenzregulierung von FRMCS abdeckt [7, 8]. Aufgrund der gestiegenen Anforderungen an die Datenübertragungsraten hat die Europäische Kommission dem Eisenbahnsektor zusätzliche 10 MHz Bandbreite für den FRMCS-Betrieb im 1900 MHz Frequenzspektrum mit Zeitmultiplexverfahren (TDD) zugewiesen [9]. Im TDD-Verfahren werden das Senden und Empfangen der Signale vom und zum Zug zeitlich aufgeteilt. Diese Bandbreite ergänzt die 2x 5,6 MHz im gepaarten 900 MHz Frequenzspektrum mit Frequenzmultiplexverfahren (FDD), bei dem die Signale vom und zum Zug im Frequenzbereich geteilt werden und das bereits heute von GSM-R genutzt wird. Zusätzliche Bandbreite ist jedoch nur eine Voraussetzung für die angestrebte Digitalisierung des Bahnbetriebs. Gleichzeitig müssen neue funktechnische Features genutzt und eingeführt werden.

Fortschrittliche Mehrantennen-Funksysteme sind Schlüsselemente, um höhere Datenraten zu erreichen, die Robustheit zu optimieren und die Zellreichweite in bahnbetrieblichen Funknetzen zu steigern. Bislang nutzen Eisenbahninfrastrukturbetreiber keine modernen Antennentechniken wie MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) oder CoMP (Coordinated Multi-Point) in den 2G-basierten GSM-R-Funknetzen. Darüber hinaus fehlt es an praktischen Erfahrungen aus experimentellen Feldversuchen und aus Pilotimplementierungen von bahnbetrieblichen Mobilfunknetzen der nächsten Generation. Dies veranlasste die DSD, eine erste Feldstudie zu Mehrantennentechnologien in einem Erprobungsnetz entlang einer ländlichen Bahnstrecke zu starten sowie die Auswirkungen auf das zukünftige Funknetzdesign im Rahmen von FRMCS zu untersuchen [10].

2 Mehrantennen-Funktechnologien bei 1,9 GHz

Mehrantennen-Funktechnologien sind eine Sammlung verschiedener Übertragungstechniken in der drahtlosen Kommunikation, die auf mehreren Antennenelementen am Empfänger und am Sender in Kombination mit fortschrittlicher Signalverarbeitung in der Steuerung dieser Empfänger und Sender beruhen. Diese Technologien werden eingesetzt, um eine verbesserte Kapazität, eine bessere Streckenabdeckung und höhere Datenraten pro Nutzer zu erzielen. Im 1900 MHz TDD Frequenzspektrum ist die größte konventionell realisierbare Mehrantennenkonfiguration an den Funkstandorten entlang der Bahnstrecke ein sog. 8T8R-System mit acht Sendern und acht Empfängern. Dies wird über eine herkömmliche 8-Port-Antenne realisiert mit vier Antennenarrays und doppelt polarisierten Antennenelementen pro Array im Radom

ning 2G based GSM-R system, which cannot meet the future connectivity requirements of digital rail operations [5].

Compared to today's rail operations, the new use cases will lead to substantially increased connectivity requirements. For instance, the average data rate required per train is expected to increase by two orders of magnitude to several Mbps/train. At the same time, the number of trains running on the tracks is also expected to increase. Latency requirements are likewise becoming substantially more stringent with some use cases, especially within the context of fully automated driving, requiring end-to-end (E2E) latencies in the order of 10 ms [6].

Leading European railways and the industry are working together closely to specify FRMCS in the standardisation groups of UIC (International Union of Railways), ETSI (European Telecommunications Standards Institute) and 3GPP (3rd Generation Partnership Project), while ECC CEPT (Electronic Communications Committee in the European Conference of Postal and Telecommunications Administration) covers the spectrum regulation domain of FRMCS [7, 8]. Due to the significantly increased data rate demands, the European Commission has granted an additional 10 MHz of spectrum to the railway sector for FRMCS operations in the 1900 MHz Time Division Duplex (TDD) regime [9], where the sending and receiving of signals to and from the train is divided in time. This bandwidth will be used as a complement to the 2x 5.6 MHz in the paired 900 MHz Frequency Division Duplex (FDD) regime, where signals to and from the train are divided in the frequency domain, and which is already used by GSM-R today. However, additional spectrum is only one prerequisite to enable the envisioned digitalisation of rail operations. New radio technology features also need to be exploited and introduced.

Advanced multi-antenna radio systems are critical elements for achieving higher data rates, optimising robustness and substantially increasing the cell range in the rail communication networks. Railway infrastructure managers are currently not using innovative antenna techniques such as multiple-input multiple-output (MIMO) or Coordinated Multi-Point (CoMP) in the 2G based radio networks that they operate. Moreover, there is also a lack of real-world experience acquired from experimental and pilot trials of the next generation of communication networks within the railway context. DSD induced the first field study on multi-antenna radio technologies in a test network deployment along rural railway tracks and investigated their impact on future radio network design within the context of FRMCS [10].

2 Multi-antenna radio technologies at 1.9 GHz

Multi-antenna radio technologies are a collection of different transmission techniques in wireless communications based upon multiple antennas at the receiver and transmitter in combination with advanced signal processing in the controllers for these receivers and transmitters. These technologies are used to achieve better system performance in terms of improved capacity, improved coverage and higher data rates per user. In the 1900 MHz TDD spectrum, the largest conventional multi-antenna configuration that can be implemented at the radio sites across the track is a so-called 8T8R system with eight transmitters and eight receivers. They are realised using an 8-port antenna with four antenna columns in the radome and dual-polarised antenna elements per column

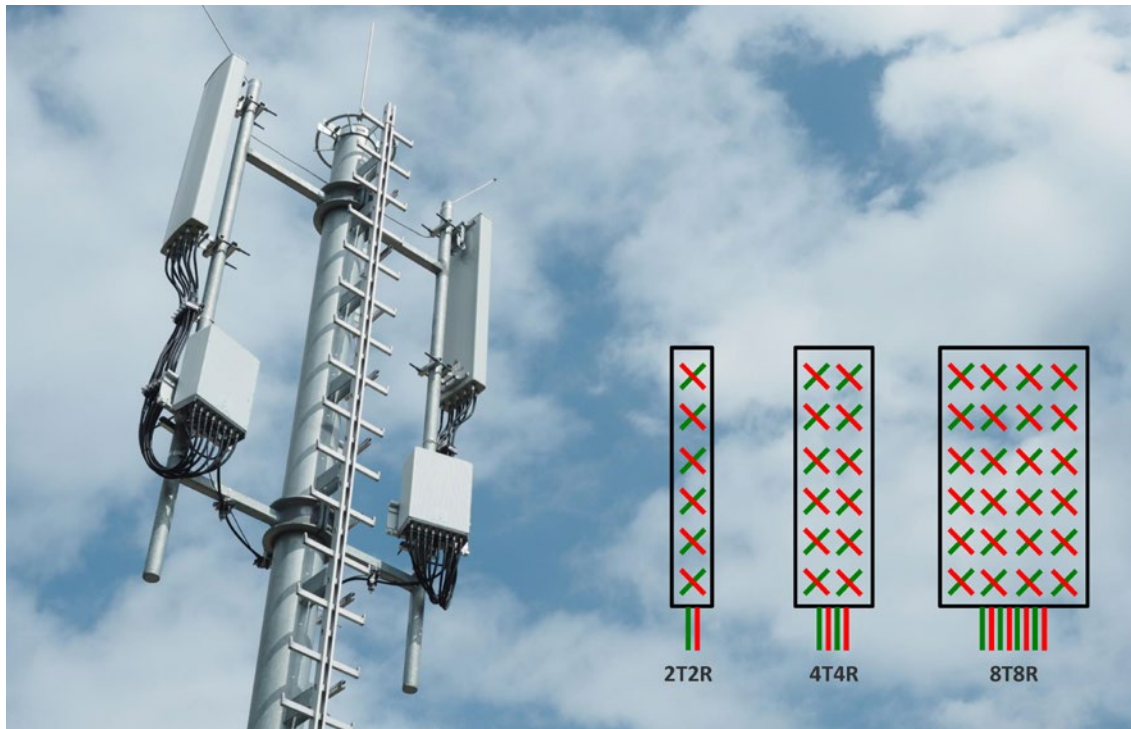


Bild 1: Antennen-Setup der Feldstudie und Überblick über streckenseitige Antennenkonfigurationen für 1,9 GHz FRMCS-Funknetze. 8T8R steht für acht Sender und acht Empfänger, realisiert über vier Antennenarrays mit kreuzpolarisierten Elementen.

Fig. 1: Antenna setup of the field study and an overview of track-side antenna configurations for the 1.9 GHz FRMCS radio networks. 8T8R denotes eight transmitters and eight receivers, realised via four antenna columns with cross-polarised elements.

Quelle / Source: DB

(Bild 1). Ein solches größeres Basisstations-Antennensystem unterstützt auch digitales Beamforming in horizontaler Richtung, um die Strecke besser ausleuchten zu können.

2.1 Multiple-Input-Multiple-Output(MIMO)-Betrieb

Bei MIMO gibt es mehrere Antennenelemente an den Sendeantennen- und an den Empfängerantennengruppen und dies sowohl im FRMCS-Modul im Zug als auch an den Funkstandorten entlang der Strecke. Typischerweise haben die streckenseitigen Antennen mehr Antennenelemente als die fahrzeugseitigen FRMCS-Modems.

Mit MIMO können mehrere Datenströme parallel über die Luft auf der gleichen Funkressource übertragen werden. Man spricht vom räumlichen Multiplex-Gewinn. Dies ist vergleichbar mit Fahrzeugen auf einer Autobahn, die in zwei oder mehr Fahrspuren in beiden Richtungen parallel von einem Punkt zum anderen fahren.

Bei der 2x2 MIMO-Technologie werden bis zu zwei einzelne Datenströme gleichzeitig von zwei unabhängigen Antennen gesendet. Im Vergleich zu einem Netzwerk mit Einzelantennen kann 2x2 MIMO die Datenrate prinzipiell um den Faktor zwei erhöhen. Bei 4x4 MIMO werden vier Antennen verwendet, um bis zu vier Datenströme mit dem Empfangsgerät zu realisieren unter der Voraussetzung, dass das Gerät über vier Empfänger verfügt. Im Falle von vier Sendern und nur zwei Empfängern kann 4x2 MIMO realisiert werden. Die gleiche Logik gilt für 8x4 MIMO bzw. 8x2 MIMO. Bei der künftigen Planung von MIMO-Systemen müssen Eisenbahninfrastrukturbetreiber die Umgebungsbedingungen der jeweiligen Strecke, insbesondere die Multipfad-Signalausbreitung, berücksichtigen.

Bei einem streckenseitigen System mit hoher Anzahl von Sendeantennen wie einem 8T8R-System kann im Downlink, bzw. der bahnbetrieblichen Land-zu-Zug-Kommunikation, ein zusätzliches digitales Beamforming als Strahlformung in horizontaler Richtung erreicht werden. Beamforming ist die Fähigkeit, Energie über den Funkkanal in eine bestimmte Richtung zu bündeln. Ein Datenstrom wird mittels digitaler Signalverarbeitung auf mehrere Sendeantennen abgebildet. Hierbei entsteht ein Strahlungsmuster im

(fig. 1). Such a large base station antenna system could also provide digital beamforming in the horizontal direction so as to better serve the track's route.

2.1 Multiple Input Multiple Output (MIMO) operations

MIMO uses multiple antenna elements at the transmitter antenna arrays and at the receiver antenna arrays in both the FRMCS unit in the train and at the radio sites across the track. The track-side antennas will typically have more antenna elements than the onboard FRMCS equipment.

MIMO allows multiple data streams to be transmitted in parallel over the air using the same physical time-frequency resources of the utilised spectrum. This creates a spatial multiplexing gain. This can be compared with vehicles that are moving from one point to another in multiple lanes in parallel on a highway with multiple lanes in both directions.

2x2 MIMO technology enables up to two individual data streams to be sent simultaneously by two independent antennas. Compared to a single antenna network, 2x2 MIMO can, in principle, increase the data rate by a factor of two. With 4x4 MIMO, four antennas are used to realise up to four streams of data with the receiving device. The condition is that the device needs to have four receivers. 4x2 MIMO can be realised in the case of four transmitters and only two receivers. The same logic applies to 8x4 MIMO and 8x2 MIMO respectively. When planning future MIMO deployments, railway infrastructure managers need to consider the radio environment conditions of the specific tracks, especially in terms of their multi-path signal propagation characteristics.

In the case of a multi-antenna trackside system with a higher order of transmitters, e.g. a system supporting 8T8R, additional digital beamforming in the horizontal direction can be achieved in the downlink, i.e. in ground-to-train communication. Beamforming is the ability to direct radio energy through the radio channel in a specific receiver's direction. A stream of data is mapped to multiple transmit antennas using

Sinne einer dynamischen benutzerspezifischen Sendeleule. Diese Art der Strahlformung kann in einer Eisenbahnumgebung von Vorteil sein, wo die Strahlen entlang der Gleise ausgerichtet werden sollen.

Im Uplink, bzw. der bahnbetrieblichen Zug-zu-Land-Kommunikation, ist die Anzahl der nutzbaren Sendeantennen des FRMCS-Zugmoduls in der Regel auf eine oder zwei begrenzt. In diesem Fall ist ein Performanzgewinn durch Verwendung mehrerer Empfangsantennen an den Funkstandorten möglich, der sog. Empfangsdiversitätsgewinn. Theoretisch kann durch eine Verdoppelung der Empfängerantennen von zwei (wie bei 1x2 oder 2x2 MIMO) auf vier (wie bei 1x4 oder 2x4 MIMO) die Empfangsleistung um 3 Dezibel (dB) erhöht werden bzw. um 6 dB bei acht Empfängern (wie bei 1x8 oder 2x8 MIMO). Die dadurch ermöglichte bessere Abdeckung führt dazu, dass eine größere Entfernung zwischen Mastfunkstandorten entlang der Strecke oder eine höhere Datenrate der FRMCS-Zugmodule möglich ist.

2.2 Coordinated Multi-Point (CoMP)-Betrieb

FRMCS-Funkstandorte entlang von Bahnstrecken beherbergen im Normalfall zwei Funkzellen, welche in jede Richtung des Gleises ausgerichtet sind. Jede Funkzelle verwendet das gleiche Frequenzband, wodurch diese gegenseitig Störungen verursachen können. Unter Coordinated Multi-Point (koordinierter Mehrpunktbetrieb) werden Mehrantennentechnologien zur Koordination zwischen Funkzellen zusammengefasst, bei der mehrere Radio Units (streckenseitige Funkanlagen) mit ihren jeweiligen Antennen gleichzeitig verwendet werden, um die Antennensignale in den Radio Controllern (zentrale Funksteuerungseinheiten) gemeinsam zu verarbeiten. Die Verfahren können dazu verwendet werden, die gegenseitigen Störungen durch ein koordiniertes Sendeschema im Downlink (Land-zu-Zug-Kommunikation) zu verringern oder durch Kombination der Empfangssignale an mehreren Funkzellen die Empfangsqualität im Uplink (Zug-zu-Land-Kommunikation) zu erhöhen.

Uplink CoMP verbessert insbesondere die Empfangsqualität im Grenzbereich zwischen den Zellen (Bild 2). Damit wird die Abdeckung des Funkstandorts erweitert oder die Datenrate am Zellrand aufgrund der besseren Funkbedingungen verbessert.

Downlink CoMP ist eine Koordination der Signale, die von den Funkstandorten an die FRMCS-Module im Zug gesendet werden. Der Radio Controller analysiert die Signalqualität der verschiedenen Radio Units und ergreift Maßnahmen zur Minimierung von Interferenzen zwischen den verschiedenen Radio Units und Antennen. Dies verbessert die Datenrate für das FRMCS-Zugmodul.

digital signal processing, thus creating a user-specific radiation pattern or beam. This type of beamforming can be beneficial to the railway environment, where beams should be directed along the track.

In the uplink direction, i.e. in the communication from the FRMCS unit in the train to the ground, the number of utilisable transmitters onboard is usually limited to one or two. Here, the use of multiple receivers at the radio sites will bring substantial advantages in terms of receiver diversity gain. In theory, the doubling of the receivers from two (as in 1x2 or 2x2 MIMO) to four (as in 1x4 or 2x4 MIMO) will increase coverage by 3 decibels (dB) and 6 dB better coverage could be obtained using eight receivers (as in 1x8 or 2x8 MIMO). The better coverage means that either a larger distance between the radio sites or an increased data rate for the FRMCS devices is possible.

2.2 Coordinated Multi-Point (CoMP) operation

FRMCS radio sites will host multiple radio units and antennas and create multiple radio cells. Usually it will be two cells per site, pointing in each direction of the track. The radio cells along the rail track use the same frequency band, thus causing interference to each other. CoMP operation is a multi-antenna scheme designed to enable coordination among the different radio cells. In particular, multiple radio units with their own antennas are used to jointly combine and process the antenna signals in the radio controllers. This can involve a joint reception scheme in the train-to-ground direction (uplink) or a coordinated transmission scheme in the ground-to-train direction (downlink). Uplink CoMP with joint reception improves the quality of the signal sent by the FRMCS unit in the train especially in any border areas between two radio sectors, as shown in fig. 2. The benefit of combining the uplink antenna signals lies in the fact that either the coverage of the radio site will be extended or the data rate will improve due to the better radio conditions.

Downlink CoMP involves the coordination of the signals sent by the radio sites to the FRMCS unit in the train. The radio controller analyses the signal quality from the different radio units and takes measures to minimise any interference between the different radio units and antennas. This results in a better data rate for the FRMCS unit in the train.

3 About the field trial project

DSD initiated an R&D collaboration in 2021 to study the benefits of multi-antenna technologies in the field. This involved

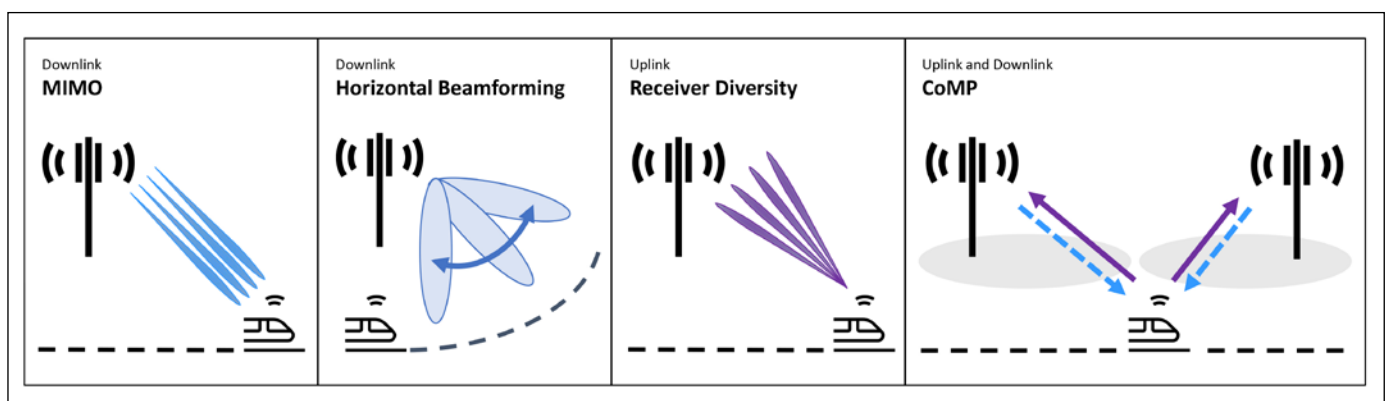


Bild 2: Betrachtete Mehrantennen-Funktechnologien

Fig. 2: The considered multi-antenna radio technologies

Quelle / Source: DB/Ericsson

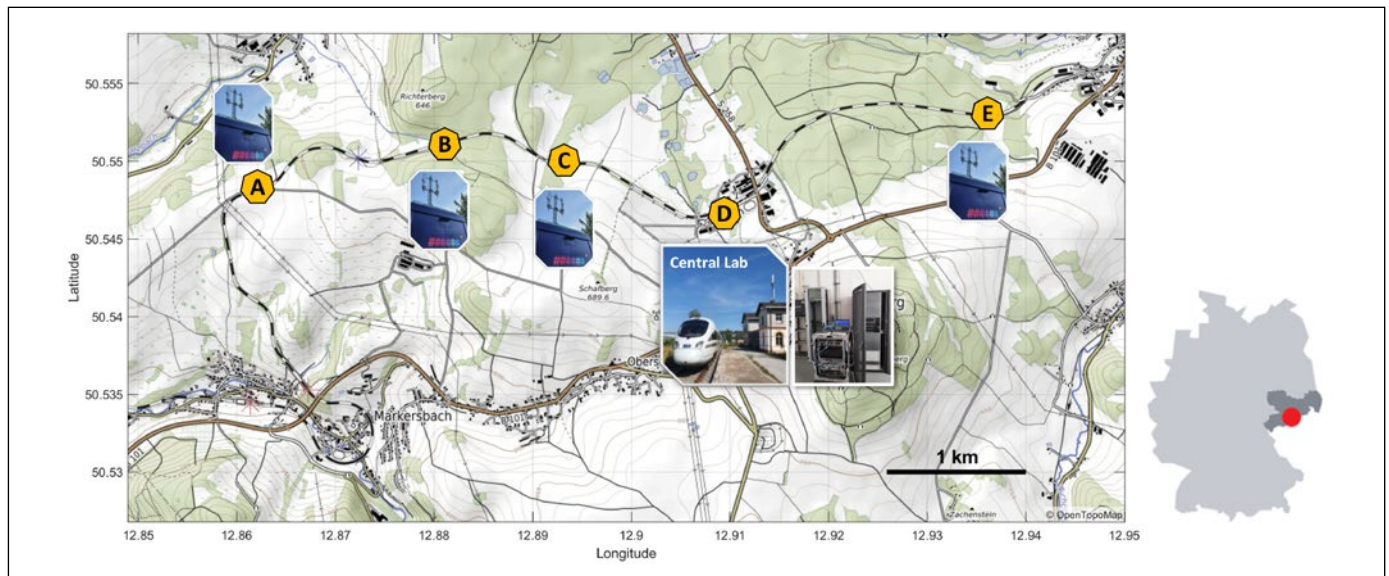


Bild 3: FRMCS-Teststrecke und Funkstandorte der 1,9-GHz-Feldstudie im Digitalen Testfeld Bahn der „Digitalen Schiene Deutschland“

Fig. 3: The FRMCS test track and the radio sites in the 1.9 GHz field study in the Digital Rail Testbed of "Digitale Schiene Deutschland"

Quelle / Source: DB

3 Über die Feldstudie

Für die Praxisuntersuchung von Mehrantennen-Funktechnologien initiierte DSD im Jahr 2021 eine FuE-Kooperation zwischen drei Parteien: DB Netz AG und DB Erzgebirgsbahn für die Bereitstellung von Gleis- und Zuginfrastruktur, Ericsson als Betreiber der Mobilfunk-Testinfrastruktur inkl. Radio Access Network (RAN), Kernnetz und Transportnetzkomponenten sowie Rohde & Schwarz als Anbieter von spezialisierten Messgeräten und -dienstleistungen. Die Feldversuche fanden über fünf Monate im Digitalen Testfeld Bahn von DSD statt. Das Testfeld befindet sich zwischen den Städten Schwarzenberg und Annaberg-Buchholz in ländlicher Umgebung im Erzgebirge in Deutschland. Es ermöglicht Testkampagnen mit 50 km/h. DSD hat einen 10 km langen Streckenabschnitt mit der Basisinfrastruktur für den Betrieb eines mobilen Testnetzes ausgestattet, darunter Antennenmasten, Glasfaserverbindungen und ein zentrales Labor mit Serverräumen. Für die Mehrantennen-Feldstudie wurden fünf Funkstandorte entlang der Teststrecke genutzt (Bild 3). Der Funkstandort im Zentrallabor (Standort D) verwendet einen 15 m hohen Antennenmast, während die weiteren Funkstandorte Masten von 10 m Höhe verwenden.

3.1 Aufbau des Mobilfunknetzwerks

Pro Funkstandort wurden zwei Radio Units eingesetzt und zwei 8T8R-Antennen mit entgegengesetzter Ausrichtung. So wurden zehn Funkzellen realisiert (Bild 4). Das Mobilfunknetz wurde im TDD-Frequenzbereich 1900-1910 MHz mit einem LTE-Ökosystem betrieben, da für jenen Frequenzbereich zum Zeitpunkt der Studie noch keine 5G-Endgeräte existierten.

Als Netzwerktopologie wurde die sog. Centralized RAN-Architektur, bzw. C-RAN, verwendet. Diese zentralisiert die Radio Controller entfernt von den Funkstandorten, wobei mehrere Funkstandorte vom zentralen Hub aus gesteuert werden. Die Verbindung zwischen den Funkstandorten (mit Radio Units und Antennen) und den Radio Controllern erfolgt über Glasfaser, bspw. durch Nutzung der Dense-Wavelength-Division-Multiplexing (DWDM)-Technologie. Aufgrund der zeitkritischen Kommunikation zwischen der Radio Unit und den Controllern ist die Entfernung auf 15 km begrenzt. Die zentralisierte Architektur mit C-RAN verein-

three parties: DB Netz AG and DB Erzgebirgsbahn as the provider of the track and train infrastructure, Ericsson as the operator of the mobile network test infrastructure, including the Radio Access Network (RAN), Core Network and Transport components, and Rohde & Schwarz as the provider of specialised onboard measurement equipment and services.

The field trials took place over five months at the DSD Digital Rail Testbed. The testbed is situated between the towns of Schwarzenberg and Annaberg-Buchholz in a rural and moderately hilly part of the Ore Mountains region in Germany. It allows test campaigns to be performed at speeds of 50 km/h. DSD has equipped a 10 km segment of the railway track with the basic infrastructure to operate a mobile test network, including antenna masts, fibre-optic connectivity and a central lab with server rooms. Five radio locations were used along the test track for the multi-antenna radio tests (fig. 3). The radio site at the central lab (site D) uses a 15 m high antenna mast, while remote radio sites use 10 m high antenna masts.

3.1 Mobile network deployment

Two radio units were deployed per radio site and two 8T8R antennas with opposite alignment were installed. In this way, ten radio cells were realised as shown in fig. 4. The mobile network operated in the TDD 1900-1910 MHz frequency range with an LTE ecosystem. Note that no 5G ecosystem was present for the 1.9 GHz frequency regime at the moment of the trial.

A so-called Centralised RAN architecture, or C-RAN, was used as the network topology. This centralises the radio controller functionality further away from the radio sites and can control multiple radio sites from a central hub. Optical fibre connects the radio sites (with radio units and antennas) and the radio controllers. The maximum distance is generally limited to 15 km due to the time-critical communication between the radio unit and controller. In the trials, the fibre connection was realised using the Dense Wavelength Division Multiplexing (DWDM) technology. Centralised processing with C-RAN simplifies the network management, enables resource pooling and improves the coordination of radio signals such as multi-point combined processing.

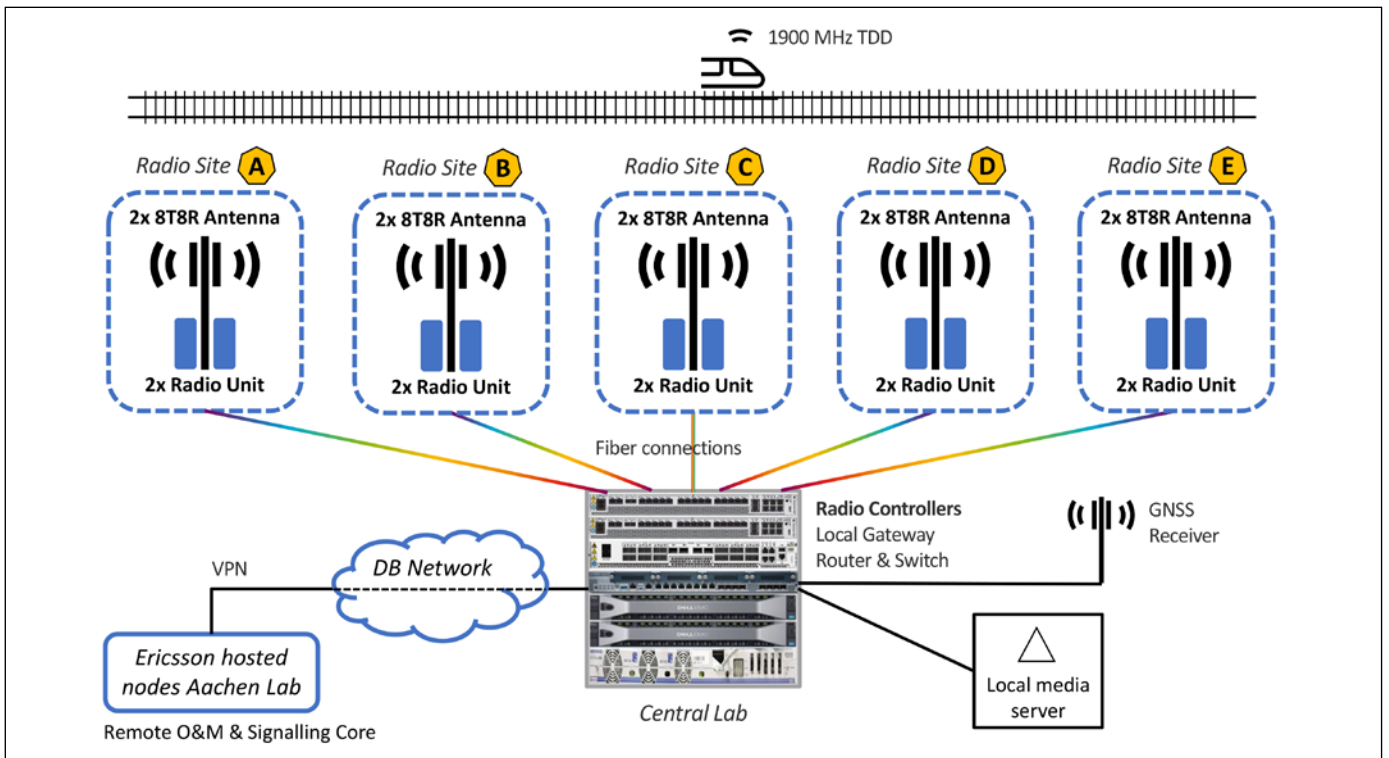


Bild 4: Überblick über das Mobilfunk-Testnetzwerk der 1,9-GHz-Feldstudie

Fig. 4: An overview of the mobile test network for the 1.9 GHz field study

Quelle / Source: Ericsson

Steuern, stellen, sichern.



Scheidt & Bachmann – innovative Sicherheitstechnologie seit 1872.

- Betriebsleittechnik
- Stellwerkstechnik
- Bahnübergangstechnik



Bild 5: Fotos des „advanced TrainLab“ der DB und des in den Messkampagnen verwendeten Antennenträgers

Fig. 5: Photos of DB's "advanced TrainLab" and its rooftop antenna platform being used in the measurement trials

Quelle / Source: DB

facht das Netzmanagement, ermöglicht das Pooling von Ressourcen und verbessert die Koordination von Funksignalen wie z. B. kombinierte Multi-Point Signalverarbeitung.

Als Testzug wurde das „advanced TrainLab“, der ICE-Laborzug der Deutschen Bahn AG (DB), eingesetzt (Bild 5). Es bietet eine Plattform mit mehreren Montageplätzen für Dachantennen, jeweils mit gleicher Kabellänge ins Zuginnere. In den Feldversuchen wurden je nach Messkampagne MIMO-fähige Zugantennen mit unterschiedlicher Anzahl von Strahlern eingesetzt, d. h. 1-Port-, 2-Port- oder 4-Port-Antennen. Der Peak-Gewinn bei 1.9 GHz war bei allen Antennen vergleichbar. Das FRMCS-Testmodem arbeitete mit Leistungsklasse 3 (max. 23 dBm Ausgangsleistung im Uplink).

3.2 Messkampagnen und Ergebnisse

Detaillierte Messaufbauten und Auswertungen der Feldversuche wurden in [10] veröffentlicht. Nachfolgend werden Trends für den MIMO- und CoMP-Betrieb vorgestellt. Hierfür wurde eine statistische Auswertung der Netto-Datendurchsätze im Downlink (PDSCH) bzw. Uplink (PUSCH) durchgeführt, gemittelt über die Messwerte aller Zellen ohne Berücksichtigung von Wiederholungsübertragungen. Eine tiefere Analyse einzelner Funkzellenbereiche der Teststrecke ist nicht Teil dieses Beitrags. Zudem ist zu beachten, dass alle Ergebnisse von der Mehrwegeausbreitung und den Umgebungscharakteristika des untersuchten ländlichen Gebiets abhängen.

Festgestellt wurde, dass der MIMO-Gewinn im Downlink (Land-zu-Zug-Kommunikation) mit zunehmender Anzahl von Empfängern

The experimental ICE "advanced TrainLab" owned by Deutsche Bahn AG (DB) was used as the test train. It provides a platform with several mounting spots for rooftop antennas and equal cable length to the train cabin (fig. 5). In the field trials, MIMO-capable onboard antennas with different numbers of emitters were used depending on the measurement campaign, i.e. 1-port, 2-port or 4-port antennas. All antennas had a similar peak gain at a frequency of 1.9 GHz. The test modem in the train cabin used power class 3 (a max. power output of 23 dBm in the uplink).

3.2 Measurement campaigns and results

Detailed measurement setups and evaluations of the trials have been published in [10]. Some of the trends for MIMO and CoMP operations will be discussed below. These trends are based on a statistical evaluation of the net downlink (PDSCH) or the net uplink (PUSCH) throughput averaged over the measurement samples from all the cells without considering retransmissions. This article does not include a deeper analysis of any specific areas of the radio cells in the test track. Please also note that all the results are subject to the multipath propagation conditions and environmental characteristics of the studied rural setup.

The MIMO gain in downlink (ground-to-train communication) was found to increase with the increasing number of receivers on the onboard antenna. The average gain over all the radio cells was greater than 30 % for both 4x2 vs 4x1 MIMO

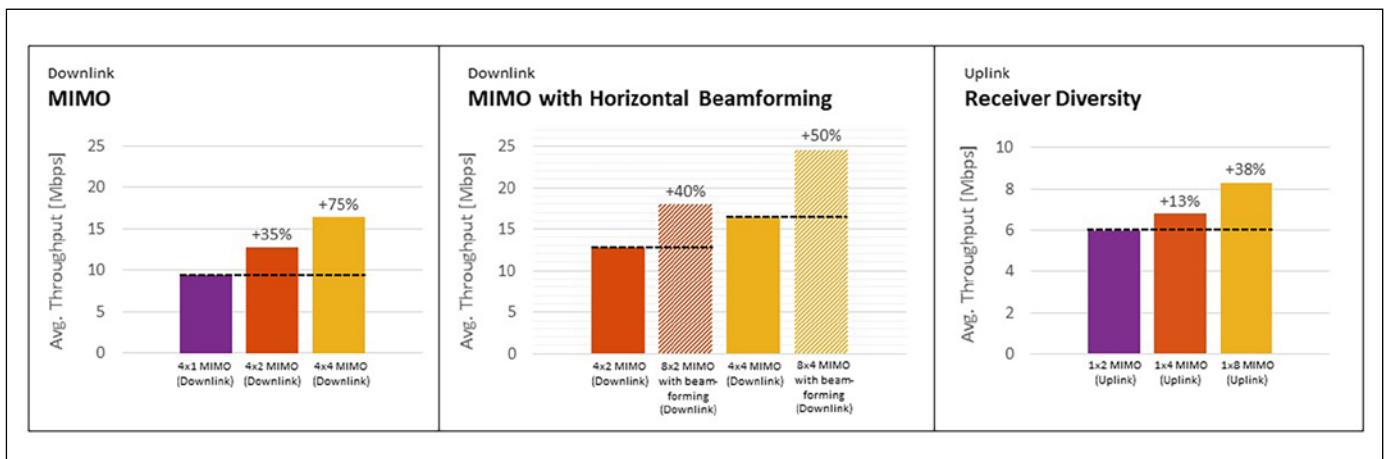


Bild 6: Verbesserungspotenziale von ausgewählten Mehrantennen-Funktechnologien (fallspezifische Beispiele)

Fig. 6: The performance trends of selected multi-antenna radio technologies (case-specific examples)

Quelle / Source: DB/Ericsson

an der Bordantenne steigt. Der Gewinn über alle Funkzellen betrug über 30 % sowohl für 4x2 ggü. 4x1 MIMO als auch für 4x4 ggü. 4x2 MIMO. Höherer Übertragungs-Rang, ein Indikator für die Anzahl der erreichbaren parallelen Datenströme, die räumlich gemultipliziert werden können, und höhere Modulation und Kodierung trugen am meisten zu der Leistungssteigerung bei. Die Nutzung von MIMO in Kombination mit horizontalem Beamforming im Downlink hatte einen noch stärkeren Effekt. Hier ergab der Vergleich von 8x2 ggü. 4x2 MIMO einen Gewinn von ca. 40 %, während 8x4 ggü. 4x4 MIMO eine Leistungssteigerung von 50 % erreichte, wenn man den durchschnittlichen Durchsatz über alle Zellen betrachtet.

Der Empfangsdiversitätsgewinn im Uplink (Zug-zu-Land-Kommunikation) betrug 13 % mit vier Empfängern (1x4 MIMO) und 38 % mit acht Empfängern (1x8 MIMO) für den durchschnittlichen Durchsatz im Vergleich zur Verwendung von zwei Empfängern in den streckenseitigen Antennen (1x2 MIMO). Betrachtet man einzelne Bereiche der Messstrecke entlang offener Feldabschnitte, war das Delta zwischen den Uplink-Konfigurationen noch deutlicher im Sinne höherer Durchsätze und einer größeren Zellabdeckung [10].

Im Uplink-CoMP-Betrieb, bei dem das empfangene Funksignal des Onboard-FRMCS-Moduls in mehreren Radio Units entlang der Strecke kombiniert wird, wurde der Durchsatz mit aktivierter und nicht aktivierter CoMP-Funktion spezifisch für Übergangsbereiche von Funkzellen gemessen. Hierbei wurden Gewinne im Bereich bis 25 % festgestellt. Dabei hängt der spezifisch erzielbare Ge-

and 4x4 vs 4x2 MIMO. A higher rank, an indicator of the number of achievable parallel data streams that can be spatially multiplexed, and higher modulation and coding were the main contributors to the performance increase. Making use of MIMO combined with horizontal beamforming in the downlink had an even stronger effect. There, the comparison of 8x2 vs 4x2 MIMO showed a gain of approximately 40 %, while 8x4 vs 4x4 MIMO achieved a 50 % performance increase when assessing the average throughput over all the cells.

The receiver diversity gain in the uplink (train-to-ground communication) was 13 % with four receivers (1x4 MIMO) and 38 % with eight receivers (1x8 MIMO) for the average throughput compared to using two receivers in the trackside antennas (1x2 MIMO). When considering the individual areas of the measurement track with some open field sections, the delta between the uplink configurations was even more remarkable and led to significantly higher throughput and increased cell coverage [10].

For the tests with CoMP operations in the uplink, i.e. where the received radio signal from the FRMCS unit in the train is combined in multiple radio units along the track, the throughput performance with the CoMP feature being activated and not being activated has been measured for the radio cell borders where a train is moving out of the coverage of one cell and into the coverage of the next. Cell border gains of up to approximately 25 % were seen in the performed measurement

Bayka
seit 1885

www.bayka.de

**Innovative Kabellösungen
für Verkehrsinfrastrukturen**

*Innovative cable solutions
for transport infrastructure*

Mehr Info's hier:
[QR Code]

Labels in the illustration: eBIKE, METRO, TRAM, RAILWAY, URBAN RAILWAY, eCAR. Cable label: SIGNAL.

winn von mehreren Faktoren ab, z. B. von der allgemeinen Signalempfangsstärke im Zellrandbereich und der Last in benachbarten (Sekundär-)Zellen. Die Ergebnisse der CoMP-Messungen zeigen, dass die Wirkung von Uplink CoMP für kommerzielle FRMCS-Einsätze wertvoll sein kann. Er führt zu einer möglichen Steigerung des Datenstrom vom FRMCS-Zugmodul oder kann in eine größere Entfernung zwischen den Funkstandorten resultieren.

4 Zusammenfassung

Die Projektzusammenarbeit zwischen der DB Netz AG, Ericsson und Rohde & Schwarz im Rahmen der Sektorinitiative „Digitale Schiene Deutschland“ war die weltweit erste Felduntersuchung von Mehrantennen-Funktechnologien im zukünftigen FRMCS-Spektrum bei 1,9 GHz und lieferte relevante Erkenntnisse über Uplink-Diversitätsgewinne, Uplink CoMP und die Nutzung von MIMO-Übertragungen entlang von Bahnstrecken im ländlichen Raum unter moderaten Zuggeschwindigkeiten (50 km/h). Die Studie hat gezeigt, dass Uplink-Diversität mit mehr als zwei Empfängern an den streckenseitigen Antennen einen signifikanten Anstieg des durchschnittlichen Datendurchsatzes, der Kapazität der Funkzellen und der Abdeckung bewirkt. Die Anzahl der erforderlichen FRMCS-Basisstationen bei 1,9 GHz, bzw. die Dichte der Funkmasten, kann so reduziert werden. Es wurde gezeigt, dass Uplink CoMP eine Möglichkeit ist, die Abdeckung und Bitraten für bahnbetriebliche Anwendungen an Funkzellenübergängen zu verbessern, und dass MIMO-Antennen höherer Ordnung den Nutzerdurchsatz im Downlink erheblich steigern, wenn die Signalausbreitungsbedingungen dies zulassen. Die Ergebnisse wurden in einer Mobilfunk-Testinfrastruktur mit niedrigen Masthöhen von 10 m und 15 m erzielt. Noch bessere Funkabdeckung ist mit höheren Masten zu erwarten, wie sie im derzeitigen bahnbetrieblichen Funknetz typisch sind. Um die Trends der Feldstudie unter höherer Geschwindigkeit zu bestätigen, sind künftig weitere Erprobungsreihen erforderlich. ■

LITERATURE | LITERATURE

- [1] <https://digitale-schiene-deutschland.de/en>, Zugriff: 01.09.2022, 10:00
- [2] Marsch, P.; Fritzsche, R.; Holfeld, B.; Kuo, F.-C.: 5G for the digital rail system of the future – the prospects for FRMCS, SIGNAL+DRAHT, 3/2022
- [3] DB Netz AG, Ericsson GmbH; Design of an FRMCS 5G E2E System for Future Rail Operation (Study Report); Oct. 2021
- [4] ETSI TR 103.459; Future Rail Mobile Communication System (FRMCS) – Study on system architecture (v1.2.1); Aug. 2020
- [5] Krantzik, A.; Vrielink, A.: Future of railway radio (communication): Migration from GSM-R to FRMCS, SIGNAL+DRAHT, 4/2022
- [6] 3GPP TS 22.289; Mobile Communication System for Railways (v17.0.0); Dec. 2019
- [7] CEPT Report 74, July 2020
- [8] CEPT Report 76, Nov. 2020
- [9] Commission Implementing Decision (EU) 2021/1730; Sep. 2021
- [10] Holfeld, B.; Lossow, M.; Tyrsky, M.; Mehira, S.; Garcia, L.; Biemond, S.; Bach, C.: Field Study on Multi-Antenna Radio Technologies for Future Railway Communications at 1.9 GHz; Proceedings of IEEE VTC2022-Spring, June 2022

trials. Here, the specific gain that can be achieved depends on several factors, e.g. the general signal reception strength in the cell border area and the traffic load in the neighbouring (secondary) cells. The results of the CoMP measurements show that the effect of uplink CoMP can be valuable for commercial FRMCS deployments. It will result in a possible higher average data stream from the FRMCS unit or it can be translated into a larger distance between the radio sites.

4 Summary

The field trial project was part of a collaboration between DB Netz AG, Ericsson and Rohde & Schwarz under the “Digitale Schiene Deutschland” sector initiative. It was the first ever project of its kind to investigate multi-antenna radio technologies in the future FRMCS TDD spectrum at 1.9 GHz and has provided relevant insights into uplink diversity, CoMP in uplink and the use of higher order MIMO in a real rail environment (rural deployment) at a moderate train speed (50 km/h). The field study has shown that uplink diversity with more than two receivers at the base station shows significant gains in the average uplink user throughput, cell capacity and coverage and can reduce the number of required FRMCS base stations at 1.9 GHz. It has identified uplink CoMP (with joint reception schemes) as a way to improve application coverage, i.e. the cell-edge bitrates, and has shown that higher order MIMO provides a significant increase in the downlink user throughput when the channel conditions allow transmissions with a higher rank. The project results are subject to the deployment limitations of the mobile network infrastructure in the utilised testbed which uses lower mast heights of 10 m and 15 m. Larger coverage could be achieved when using higher masts as is typical in current railway deployments. Further insights from field studies are required to understand the performance trends in scenarios with higher speeds. ■

AUTOREN | AUTHORS

Bernd Holfeld

FRMCS Testbed & Trials Coordinator
Digitale Schiene Deutschland / Digital Rail Germany
DB Netz AG
Anschrift / Address: Stresemannstraße 123 A, D-10963 Berlin
E-Mail: bernd.holfeld@deutschebahn.com

Simon Biemond

Solution Architect
Ericsson Telecommunicatie B.V.
Anschrift / Address: Ericssonstraat 2, NL-5121 ML Rijen
E-Mail: simon.biemond@ericsson.com

Lourdes Garcia

Solution Architect
Ericsson Espana SA
Anschrift / Address: C/Retama 1 Ed Torre Suecia, E-28045 Madrid
E-Mail: lourdes.garcia@ericsson.com

Said Mehira

Project Manager
Rohde & Schwarz SwissQual AG
Anschrift / Address: Allmendweg 8, CH-4528 Zuchwild
E-Mail: said.mehira@rohde-schwarz.com