

5G-RACOM – Feldstudie zu hybriden FRMCS-Netzen für ein resilientes Bahnfunksystem

5G-RACOM – field study on hybrid FRMCS networks for resilient rail communications

Tomas Karabinos | Bernd Hoffeld | Richard Fritzsche | Nico Alte | Manfred Taferner | Shaik Muhammed Zubair Basha | Klaus Moessner | Nour Chkeri

Das deutsch-französische Innovationsprojekt 5G-RACOM untersucht die effiziente, zuverlässige und nachhaltige Nutzung des Future Railway Mobile Communication System (FRMCS) und seines Frequenzspektrums. Als Nachfolger von GSM-R wird FRMCS eine echtzeitfähige, hoch-performante Zug-Land-Kommunikation auf Basis von 5G sicherstellen und damit eine weitreichende Digitalisierung des Bahnbetriebs ermöglichen. Das Projekt untersucht hybride FRMCS-Netze, bei denen öffentlicher Mobilfunk das betriebseigene Bahnfunksystem ergänzt, beispielsweise als Rückfallebene oder zur Kapazitätserweiterung. Hierzu werden Fähigkeiten der MP-TCP- und MP-QUIC-Mehrwegeprotokolle genutzt.

1 Über FRMCS und das 5G-RACOM-Projekt

Die fortschreitende Digitalisierung und Automatisierung des Bahnbetriebs geht einher mit anspruchsvollen Konnektivitätsanforderungen, die das derzeitige 2G-basierte Zugfunksystem GSM-R nicht erfüllt. Da GSM-R in den 2030er Jahren zudem obsolet wird, wird auf europäischer Ebene das 5G-basierte FRMCS entwickelt [1, 2]. FRMCS wird angetrieben durch den Bedarf an einer verbesserten, zukunftssicheren und langfristigen bahnbetrieblichen Telekommunikation, einer verbesserten Interoperabilität sowie mehr Flexibilität zur Unterstützung des modernen und effizienten Eisenbahnbetriebs.

Die FRMCS-Standardisierung wird von der UIC (Internationaler Eisenbahnverband) und ETSI (Europäisches Institut für Telekommunikationsnormen) geprägt. Zwei Mobilfunk-Frequenzbänder (900 MHz und 1900 MHz) wurden für die Einführung von FRMCS in Europa zugewiesen [3], wobei Teile des allokierten Frequenzspektrums bereits heute mit GSM-R (900 MHz) genutzt werden. Der Zugang zu weiteren Frequenzressourcen von öffentlichen Mobilfunknetzbetreibern (PMNO) wird als Ergänzung erwogen. Die FRMCS-Architektur basiert auf zwei Hauptparadigmen: (1) Modularität, die eine Trennung von Anwendung und Übertragungssystem ermöglicht, und (2) Verwendung von standardisierten Komponenten und Off-the-Shelf-Technologien. Die Diensteunterstützung basiert auf dem sog. MCx-Framework, während für die Übertragung die 5G SA (5G Standalone)-Technologie verwendet wird. Diese bietet die Flexibilität, andere Zugangstechnologien sowie Netzwerke zu integrieren. Sowohl die Übertragungsschicht als auch die Dienste sind von 3GPP standardisiert.

Um weitere Fortschritte zu erzielen, haben sich französische und deutsche Eisenbahninfrastrukturbetreiber, Telekommunikationsanbieter, Forschungsinstitute und Hochschulen im Projekt 5G-RACOM (5G for Resilient and Green RAil COMmunications) [4, 5] zusammengeschlossen. Das Projekt wird im Rahmen des Innovationsprogramms "Franco-German Ecosystem for Private 5G Networks" gemeinsam

The German-French 5G-RACOM innovation project is investigating the efficient, reliable and sustainable use of the Future Railway Mobile Communication System (FRMCS) and its frequency spectrum. As the successor to GSM-R, FRMCS will ensure high-performance and real-time train-to-ground communication based on 5G, thereby enabling railway digitalisation. The project examines hybrid FRMCS networks, where public mobile connectivity complements the railway radio system for fallback or capacity enhancement by utilising the capabilities of the MP-TCP and MP-QUIC multipath protocols.

1 About FRMCS and the 5G-RACOM project

The advancing digitalisation and automation of rail operations is associated with highly demanding connectivity requirements. The 5G-based FRMCS is currently under development at the European level [1, 2], because the present 2G-based railway mobile communication system GSM-R does not meet these demands and will become obsolete in the 2030s. FRMCS is driven by the need for improved connectivity and performance, future-proofing to ensure long-term viability, enhanced interoperability and flexibility to support modern and efficient railway operations.

FRMCS standardisation is being driven forward by the UIC (International Union of Railways) and ETSI (European Telecommunications Standards Institute) within the Technical Committee for Railway Telecommunications (TC RT). Two railway mobile radio (RMR) frequency bands (at 900 MHz and 1900 MHz) have been allocated for FRMCS deployment in Europe [3], while parts of the radio spectrum are already in use with GSM-R (at 900 MHz). The access to additional spectrum resources from public mobile network operators (PMNOs) is considered to be complementary. The FRMCS architecture is based on two main paradigms: (1) modularity, which enables the separation of the application and the communication system, and (2) the use of standardised components and off-the-shelf technologies. The services are based on the mission critical services framework (MCx), while the transport utilises 5G SA (5G standalone) technology, which offers the flexibility to integrate other access technologies in addition to networks. Both the transport and services are standardised by 3GPP.

French and German railway infrastructure managers, telecommunication vendors, research institutes and academia have joined forces in the 5G-RACOM (5G for Resilient and Green RAil COMmunications) project [4, 5] to make further progress.

vom deutschen Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) und dem französischen Ministère de l'Économie et des Finances et de la Relance (MEFR) gefördert. Es läuft über drei Jahre bis Ende 2025 und erforscht, entwickelt und demonstriert Schlüsseltechnologien, um ein effizientes, resilientes und zukunftssicheres FRMCS-System über folgende Arbeitsschwerpunkte zu erreichen:

- 1) Effiziente Nutzung des verfügbaren FRMCS-Frequenzspektrums durch die Bereitstellung akkurater 900-MHz- und 1900-MHz-Kanalmodelle für ausgewählte Eisenbahnumgebungen auf Basis von Kanalmesskampagnen (zur Verbesserung der Funknetzplanung). Darüber hinaus Durchführung von Analysen zur FRMCS/GSM-R-Technologiekoexistenz im 900-MHz-Band.
- 2) Untersuchung hybrider Netzwerkansätze, welche private FRMCS- und öffentliche 5G-Netze kombinieren, auf Basis verschiedener Anwendungsfälle (z.B. Rückfallebene oder Kapazitätserweiterung) sowie Architekturoptionen und darüber hinaus Implementierung und Demonstration ausgewählter Mehrwegeprotokollösungen für die parallele und nahtlose Nutzung beider Netze.

2 Anwendungsfälle und Architekturen für hybride FRMCS-Netze

In hybriden FRMCS-Netzwerkarchitekturen können Anwendungen des künftigen Bahnbetriebs, die primär das private FRMCS-Netz nutzen, eine ergänzende, unabhängige Infrastruktur öffentlicher 5G-Netze verwenden und auf zusätzliche Frequenzspektren zugreifen. Dies ist vorteilhaft für die Erhöhung der Ausfallsicherheit und Verfügbarkeit im Bahnfunksystem durch parallele Nutzung mehrerer unabhängiger Verbindungen (d.h. Datenpfade). Zudem wird die Kapazität für datenintensive Dienste erhöht, betrieblich weniger relevanter Datenverkehr bei Bedarf ausgelagert und die Gesamtabdeckung verbessert. 5G-RACOM wird diese Vorteile anhand von verschiedenen Anwendungsfällen testen und demonstrieren (Bild 1).

Um die 5G-RACOM-Anwendungsfälle zu unterstützen, gibt es mehrere Realisierungsoptionen für hybride FRMCS-Netzwerkarchitekturen. Jede Architektur weist bestimmte Merkmale auf und unterliegt den Randbedingungen und der Anwendbarkeit im jeweiligen Land oder in der jeweiligen verantwortlichen Organisation. So sind beispielsweise Gesetzgebung, Funkabdeckung, Verfügbarkeit eingesetzter Technologien sowie Geschäfts- und Betriebsmodelle zu berücksichtigen. In operativen FRMCS-Netzen muss darüber hinaus über weitere Designaspekte wie Unterstützung von Roaming, Nutzung verschiedener Netz-

The project has been established under the “Franco-German Ecosystem for Private 5G Networks” innovation program set up by the German Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action (BMWK) and the French Ministère de l'Économie et des Finances et de la Relance (MEFR). It will run over three years to the end of 2025 and investigate, develop and demonstrate key technologies in order to achieve a green, resilient and future-proof FRMCS system using the following two paths:

- 1) Exploiting the available FRMCS frequency spectrum most efficiently by providing accurate 900 MHz and 1900 MHz channel models for railway environments based on channel sounding campaigns (for improving radio planning and deployments) and by conducting an FRMCS/GSM-R technology coexistence analysis in the 900 MHz band.
- 2) Investigating hybrid network approaches that combine private FRMCS and public 5G networks, studying different use cases (e.g. fallback and capacity enhancement) as well as architecture options and implementing and demonstrating selected multipath protocol solutions for the parallel and seamless use of both networks.

2 Use cases and architectures for hybrid FRMCS networks

In hybrid FRMCS network architectures, future railway applications that primarily use private FRMCS networks will be able to leverage the additional and independent infrastructure from public 5G networks and access an additional frequency spectrum. This is advantageous for increasing resilience and availability in railway communications by means of the parallel use of multiple independent connections (i.e. data paths). It also provides capacity enhancement for bandwidth-intensive services, offloads non-critical traffic when necessary and improves overall coverage.

5G-RACOM will test and eventually demonstrate these benefits using real railway applications in several high-level use cases, as illustrated in fig. 1.

There are multiple hybrid FRMCS network architecture options available to support the aforementioned use cases. Each architecture provides certain characteristics and is subject to availability and applicability in the specific country or organisation, while taking factors such as legislation, coverage, the technologies in use and the business and operating models into account. Operational FRMCS

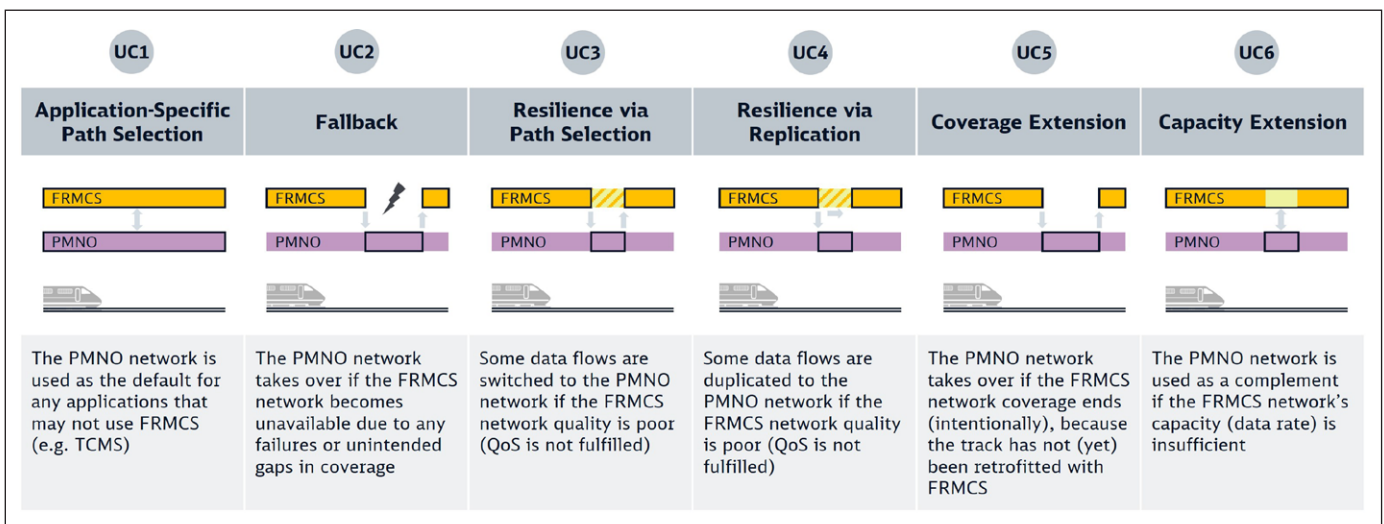


Bild 1: 5G-RACOM Anwendungsfälle

Fig. 1: 5G-RACOM use cases

Quelle / Source: DB

zugangstechnologien und verteilte Architekturen entschieden werden. Es werden neue Lösungen und technische Fähigkeiten benötigt, um all diese Anwendungsfälle vollständig umzusetzen. Das Projekt 5G-RACOM sieht die Implementierung von Multipfad-Funktionalität als wesentlich für die Erfüllung dieses Ziels an. Hierbei sei erwähnt, dass die FRMCS-Systemanforderungsspezifikation (SRS) der UIC die Multipfad-Funktionalität standardisiert und als optionale Funktion ausweist. Die Funktionalität wird durch die Multipath-Funktion (MPF) im traditionellen Client-Server-Modell unter Verwendung fortgeschrittener Mehrwege-Transportprotokolle wie MP-QUIC oder MP-TCP implementiert. Die MPF unterstützt Schlüsselfunktionen wie die Pfadsteuerung, die den Datenverkehr über den gewünschten Pfad leitet, und die Pfadumschaltung, bei welcher der Datenverkehr nahtlos von einem auf den anderen Pfad übergeht. Bei der Pfadteilung wird der Verkehr auf mehrere Datenpfade aufgeteilt, während bei der Replikation Datenpakete über mehrere Pfade kopiert übertragen werden. Zudem stellt MPF sicher, dass Anwendungen weiterhin Standard-Transportprotokolle wie TCP oder UDP verwenden können, wodurch Transparenz ggü. der Applikation erhalten bleibt. Weitere Einzelheiten sind in Abschnitt 4 zu finden. MPF ersetzt nicht zwangsläufig die Art der Zusammenschaltung mehrerer Netze, wie durch National Roaming oder MOCN (Multi-Operator Core Networks). Vielmehr kann es auch in Kombination mit diesen eingesetzt werden, um zusätzliche Funktionalitäten bereitzustellen und die Effektivität dieser Netzstrukturen zu verstärken, insbesondere in dynamischen Umgebungen, wie man sie im Bahnbetrieb vorfindet. Bild 2 zeigt ausgewählte hybride FRMCS-Netzarchitekturen zusammen mit MPF, einschließlich der von ihnen unterstützten Anwendungsfälle und der voraussichtlichen Leistung beim Wechsel zwischen den Netzen (Pfadern).

3 Multipath-Architektur in 5G-RACOM

5G-RACOM implementiert ein Architekturmodell mit einem 5G-basierten FRMCS-Netz und einem zusätzlichen öffentlichen 5G-Netz mit eigenständiger SIM-Karte (Public Subscription), siehe Bild 3. Der streckenseitige FRMCS-Diensteserver (MCx-Server) stellt Dienste für Bahnanwendungen bereit, die MCPTT-, MCDData- oder potenziell

networks must, in principle, support further use cases such as roaming, the use of various network access technologies and distributed architectures. New solutions and technical capabilities are needed to fully support all these use cases and the 5G-RACOM project sees the implementation of multipath functionality as essential to fulfill this objective. Note that the UIC's FRMCS System Requirements Specification (SRS) is standardising multipath functionality and designated it as an optional feature.

Multipath functionality will be implemented through the multipath function (MPF) in the traditional client-server model using advanced multipath transport protocols such as MP-QUIC or MP-TCP. The MPF will support key capabilities such as path steering, which directs traffic along the desired path, and path switching, which seamlessly transitions traffic between paths. Path splitting divides the traffic across multiple paths, while replication copies data packets across several paths. Additionally, the MPF ensures that applications can continue to use standard transport protocols such as TCP or UDP, thereby maintaining transparency. See Section 4 for more details.

The MPF does not replace multi-network access architectures such as national roaming or MOCN (Multi-Operator Core Networks). Rather, it has the potential to complement and bolster the effectiveness of these network structures by providing additional capabilities, especially in dynamic environments such as those encountered by a moving train. Fig. 2 illustrates selected hybrid FRMCS network architectures together with MPF, including their supported use cases and estimated performance related to switching between networks (paths).

3 Multipath architecture in 5G-RACOM

5G-RACOM's hybrid FRMCS network architecture corresponds to an implementation with a public subscription model and has been further elaborated in fig. 3. The FRMCS service server (i.e. an MCx Server) located in the trackside system provides the services offered to railway applications utilising MCPTT, MCDData or potentially MCVideo capabilities. On the train, the onboard gateway with

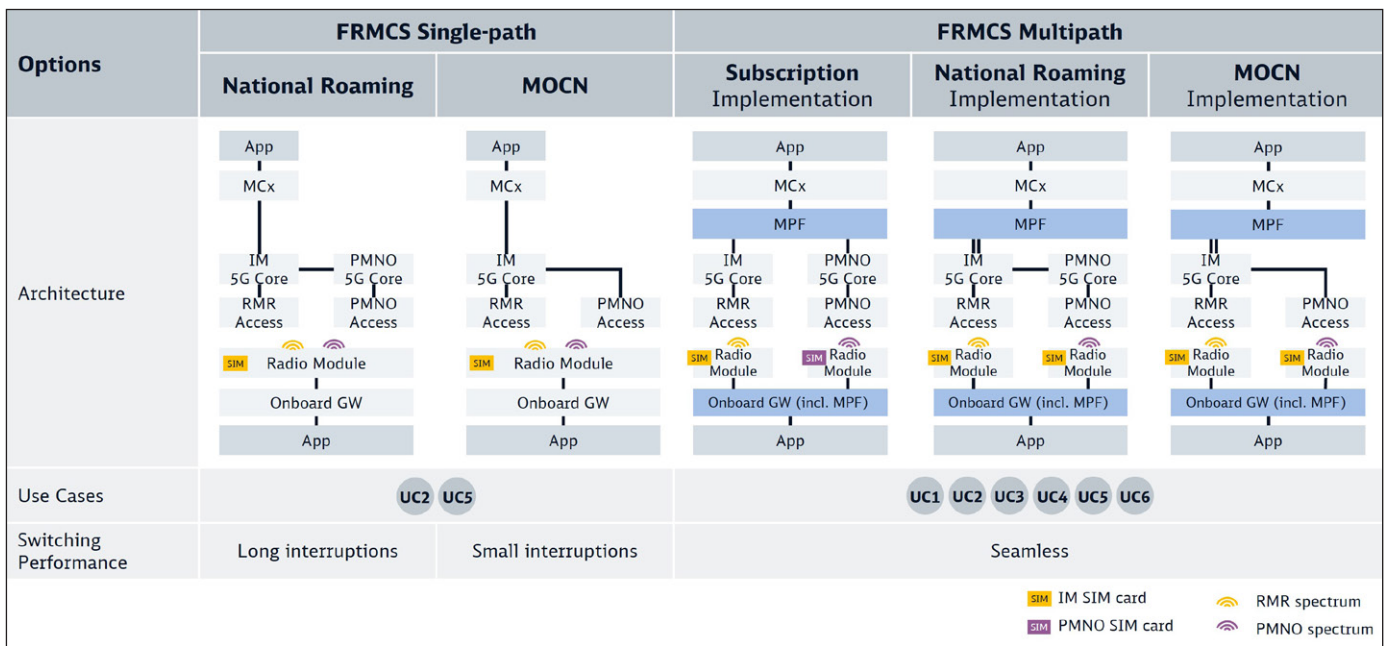


Bild 2: Architekturoptionen für hybride FRMCS-Netze

Fig. 2: Selected hybrid FRMCS network architectures

Quelle / Source: DB

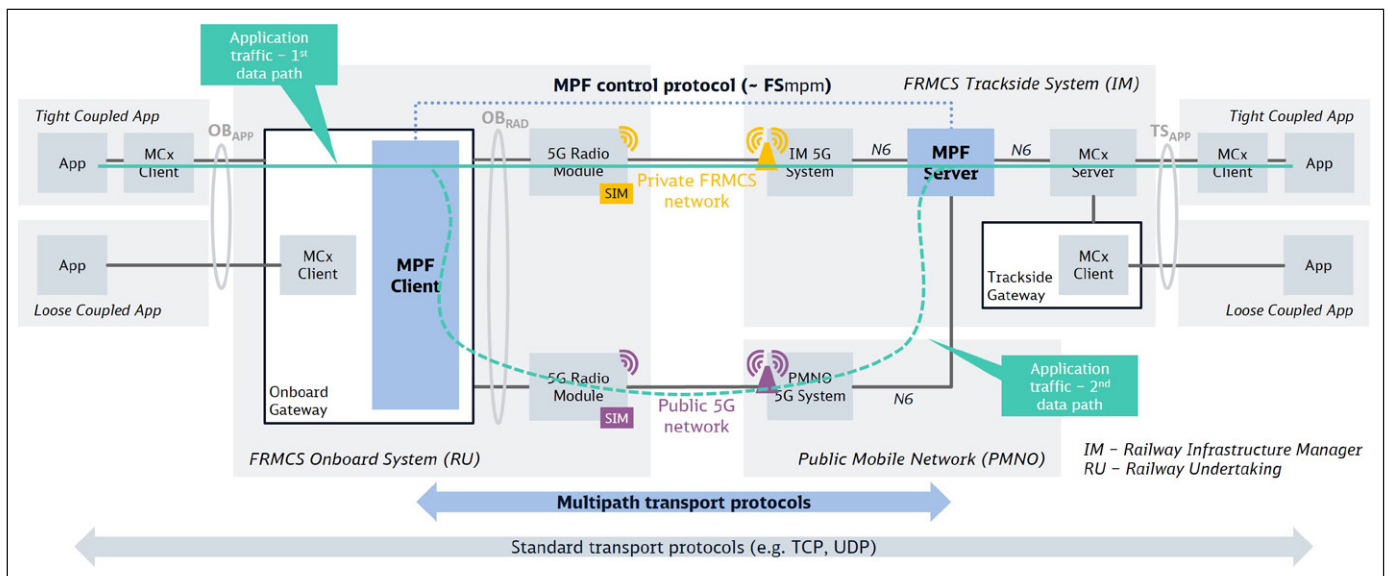


Bild 3: Hybride FRMCS-Netzwerkarchitektur im 5G-RACOM-Projekt

Fig. 3: A hybrid FRMCS network architecture for the 5G-RACOM project

Quelle / Source: DB

MCVideo-Funktionen nutzen. Im Zug ermöglicht das fahrzeugeitige Onboard-Gateway mit MCx-Client(s) mehreren Eisenbahnanwendungen den Zugriff auf das hybride FRMCS-Netz und den MCx-Server. Die MPF muss sowohl auf der Fahrzeugseite (MPF-Client) als auch auf der Streckenseite (MPF-Server) des FRMCS-Systems umgesetzt werden. Zwei 5G-Funkmodule, mit einer privaten FRMCS-SIM-Karte und der 5G-SIM-Karte eines öffentlichen Mobilfunkbetreibers (PMNO), werden in die bordseitige Systemarchitektur integriert und mit dem Onboard-Gateway verbunden, sodass jedes Netz einen unabhängigen Datenpfad bereitstellt. Das private FRMCS-Netz des Eisenbahn-Infrastrukturmanagers (IM 5G System) und das öffentliche 5G-Netz (PMNO 5G System) werden nur auf der User Plane (d.h. Datenübertragungsebene) über die N6-Schnittstelle und über den MPF-Server integriert. Der MPF-Server verankert den gesamten Datenverkehr und wird in Form eines eigenständigen GW/Proxy zwischen den 5G-Systemen und anderen streckenseitigen Netzwerkelementen wie dem MCx-Server eingesetzt. Hierbei ist zu erwähnen, dass der MPF-Server im Rahmen der Möglichkeiten von 5G-RACOM nicht mit dem MCx-Server oder der Policy Control Function (PCF) auf der Control Plane (d.h. N5/N33-Signalisierung) integriert wird, obwohl dies für spätere betriebliche Einsätze für eine Interaktion mit dem 5G-QoS-Management vorgesehen ist. MPF-Client und -Server unterstützen die Mehrwege-Transportprotokolle MP-QUIC und MP-TCP.

4 Multipath-Protokolle in 5G-RACOM

Herkömmliche Transportprotokolle wie TCP und UDP sind für die Datenübertragung über einen Pfad zwischen Quelle und Ziel konzipiert. Sie ermöglichen eine zuverlässige Datenübertragung (TCP) oder eine schnellere, verbindungslose Kommunikation (UDP). Mit Mehrwege-Transportprotokollen können Daten parallel über verschiedene Pfade übertragen werden, wodurch sich Bandbreitennutzung und Zuverlässigkeit erheblich verbessern. Dieser Ansatz erweitert das Einpfad-Konzept, indem er verschiedene Sub-Flows anlegt, mit jeweils eigener IP-Adresse, die aber zur selben Verbindung gehören (Bild 4).

Mehrwege-Transportprotokolle führen neue Funktionen ein, wie z.B.:

- **Steering (Pfadsteuerung):** Die Fähigkeit, eine oder mehrere Netzwerkschnittstellen für neue Datenströme auszuwählen und zu verwenden. Sie ermöglicht dem Mehrwegetransport, den ankomen-

MCx Client(s) allows multiple railway applications inside the train to access the hybrid FRMCS network and the MCx Server. The MPF must be implemented both onboard (MPF Client) and at the trackside (MPF Server) of the FRMCS system.

Two 5G radio modules, one with a private FRMCS SIM card and one with a public 5G SIM card, will be integrated into the onboard system architecture and connected to the onboard gateway, meaning that each network will provide an independent data path. The private FRMCS network of the infrastructure manager (IM 5G System) and the public 5G network (PMNO 5G System) will be integrated only at the user plane level (i.e. data only) using the N6 interface and through the MPF Server. The MPF Server will anchor all the data traffic and will be deployed in the form of a standalone GW/proxy, residing between the 5G systems and other trackside network elements such as the MCx server. Note that the MPF Server will not be integrated with the MCx Server or the Policy Control Function (PCF) on the control plane level (i.e. N5/N33 signaling) under the 5G-RACOM project, though this is envisioned for operational deployments in order to enable 5G QoS management interaction. The MPF client and server will support the MP-QUIC and MP-TCP multipath protocols.

4 Multipath protocols in 5G-RACOM

Traditional transport protocols such as TCP and UDP are designed for single-path data transmissions between a source and destination. These protocols enable reliable data transfers (TCP) or faster, connectionless communication (UDP). Multipath transport protocols allow the data to be transmitted simultaneously over multiple paths, thereby significantly improving bandwidth utilisation and reliability. This approach extends the single-path concept by creating different sub-flows, each with its own IP address, but belonging to the same connection (fig. 4).

Multipath transport protocols introduce new capabilities such as:

- **Steering:** the ability to select and use one or more specific network interfaces for new data flows. This enables multipath transport to be aware of any incoming traffic and select the appropriate network that fulfils the traffic requirements.

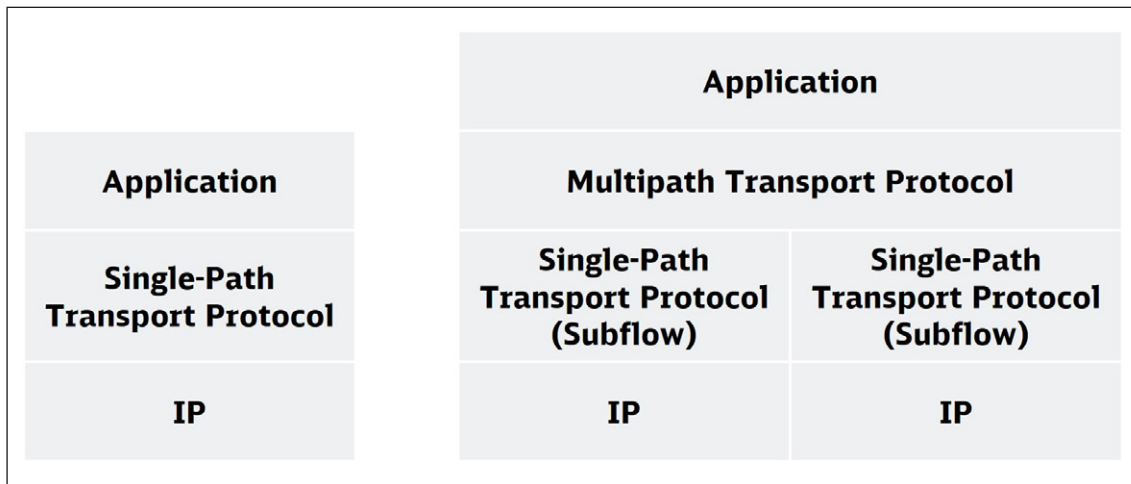


Bild 4: Einwege- und Mehrwegeprotokolle
 Fig. 4: Traditional (single-path) and multipath protocols
 Quelle / Source: TU Ilmenau

den Datenverkehr zu erkennen und das geeignete Netz auszuwählen, das die zugehörigen Anforderungen erfüllt.

- **Switching (Pfadumschaltung):** Diese Funktion ermöglicht die Handover-Mechanismen der Transportschicht und die Migration von Verbindungen. Wenn das primäre Netz oder eines der Netze eines bestimmten Datenflusses eine Verschlechterung aufweist, gewährleistet die Pfadumschaltung die Kontinuität des Dienstes.
- **Splitting (Pfadteilung):** Diese Funktion verteilt den Datenverkehr eines Datenflusses auf mehrere Sub-Flows und Pfade, um entweder die Gesamtkapazität zu erhöhen oder die Zuverlässigkeit und Ausfallsicherheit zu verbessern.
- **Replikation:** Eine weitere Form der Aufteilung, bei der dasselbe Paket über mehrere Sub-Flows gleichzeitig gesendet wird, wodurch die Gesamtkapazität verringert, die Zuverlässigkeit kritischer Daten jedoch erhöht wird.

Das 5G-RACOM-Projekt hat eine umfangreiche Bewertung durchgeführt, um das/die am besten geeignete(n) Multipfad-Protokoll(e) für die Implementierung und Erprobung auszuwählen. Folgende Protokolle wurden in Betracht gezogen: Multipath TCP (MP-TCP), Multipath QUIC (MP-QUIC), Stream Control Transmission Protocol (SCTP) mit Concurrent Multipath Transfer (CMT), Multipath Datagram Congestion Control Protocol (MP-DCCP), Multipath UDP (MP-UDP), Software-Defined Wide Area Network (SD-WAN) und Load Balancing-Based IP Routing.

Durch den Bewertungsprozess wurden allgemeine Herausforderungen für alle Multipath-Protokolle identifiziert und Lösungen bzw. Abhilfemaßnahmen definiert. Eine der größten Herausforderungen ist das Fehlen einer eigenständigen GW/Proxy-Lösung, die in der Lage ist, Mehrwege-Transportprotokolle künftig nahtlos in das Bestandsnetz zu integrieren. Die derzeitigen Implementierungen sind überwiegend end-to-end (e2e), d.h. Multipath wird auf der Anwendungsseite integriert. Eine weitere Herausforderung ist die Verwaltung doppelter Kontrollschleifen bei der Implementierung einer solchen GW/Proxy-Lösung. Dies würde die Handhabung des regulären e2e-Kontrollkreises des klassischen Transportprotokolls und eines zusätzlichen Kontrollkreises zwischen den MPF, die als Gateways fungieren, erfordern. Diese doppelte Verwaltung führt zu Komplexität bei sog. Retransmissions, Acknowledgements und der allgemeinen Protokolleffizienz (Bild 5).

Als Ergebnis der Analyse wurden MP-TCP- und MP-QUIC-Protokolle aufgrund ihrer Übereinstimmung mit betriebswirtschaftlichen Kriterien, den allgemeinen funktionalen Anforderungen und den Leistungsindikatoren ausgewählt. Während MP-TCP die meisten Kriterien erfüllt, bietet MP-QUIC zusätzliche Vorteile und Performancepotenziale.

- **Switching:** this feature enables the transport layer’s handover mechanisms and connection migration. When the primary network or any of the networks used for a specific data flow degrades, the switching functionality ensures service continuity by moving the data to available resources in order to maintain the best possible service.
- **Splitting:** this functionality distributes a data flow’s traffic across multiple sub-flows and paths either to increase overall capacity or enhance reliability and fault tolerance.
- **Replication:** another form of splitting where the same packet is sent over some or all sub-flows simultaneously, thereby decreasing the overall capacity, but increasing the reliability of critical data.

The 5G-RACOM project conducted a multi-criteria assessment to select the most suitable multipath protocol(s) for implementation and testing. The considered candidate protocols were Multipath TCP (MP-TCP), Multipath QUIC (MP-QUIC), Stream Control Transmission Protocol (SCTP) with Concurrent Multipath Transfer (CMT), Multipath Datagram Congestion Control Protocol (MP-DCCP), Multipath UDP (MP-UDP), Software-Defined Wide Area Network (SD-WAN) and Load Balancing-Based IP Routing.

By means of this process the general challenges for all the multipath protocols were identified and solutions or mitigations were defined. One major challenge involves the lack of a standalone GW/proxy solution capable of seamlessly integrating multipath transport protocols into existing network infrastructure. Current implementations are predominantly end-to-end (e2e), meaning that the multipath is integrated on the application side. Another significant challenge involves managing double control loops when implementing such GW/proxy solutions. This would require handling the regular e2e control loop of the standard transport protocol and an additional control loop between the MPFs that act as gateways. This dual management leads to complexities in retransmissions, acknowledgments and overall protocol efficiency (fig. 5).

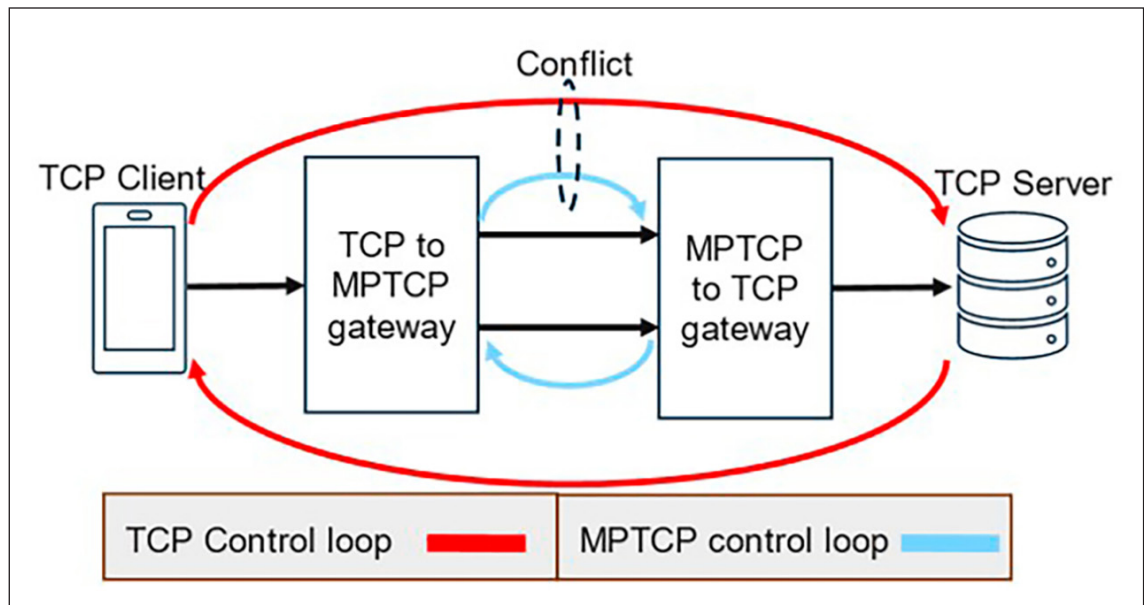
The MP-TCP and MP-QUIC protocols were selected due to their alignment with the business criteria, general functional requirements and performance indicators based on the analysis and assessment. While MP-TCP appears to fulfil most of the criteria, MP-QUIC offers additional benefits and the potential to outperform it.

- MP-TCP extends the traditional TCP, making it easier to deploy and integrate as it is already part of the Linux kernel. This enhances

Bild 5: Regelkreisproblem bei einer Gateway-Lösung

Fig. 5: Control loop problem in a gateway solution

Quelle / Source: TU Ilmenau



- MP-TCP erweitert das herkömmliche TCP, was Bereitstellung und Integration erleichtert, da es bereits Teil des Linux-Kernels ist. Es erhöht die Zuverlässigkeit, indem es mehrere Pfade aggregiert und nahtlose Failover-Fähigkeiten bietet. Die Kontrollmechanismen der Pfade können jedoch nicht ausgeschaltet werden.
- MP-QUIC basiert auf dem modernen QUIC-Protokoll, das von vorne herein niedrige Latenzzeiten und bessere Leistung für HTTP/3-Datenverkehr unterstützt. Es wurde entwickelt, um Multipath-Operationen effizient zu handhaben und Probleme mit Warteschlangenblockierungen in TCP zu reduzieren. MP-QUIC verwendet unabhängige Sequenznummern für Pfade, was eine effiziente Neuordnung ermöglicht und die Latenzzeit verringert. MP-QUIC befindet sich jedoch noch in der Entwicklungsphase und wird möglicherweise noch nicht umfassend unterstützt. Zudem bestehen Probleme mit verschlüsselter Paketprüfung und Handhabung durch Middleboxes.

Um eine dynamisch verwaltete MPF-Lösung für das hybride FRMCS-Netz zu implementieren, könnte ein **Kontrollprotokoll**, wie in Bild 3 dargestellt und von der FRMCS SRS der UIC über den FSMPPM-Referenzpunkt definiert, zwischen MPF-Client und -Server erforderlich werden, um eine nahtlose Mehrwegeverbindung sowie ein sicheres und effizientes Mehrwege-Management zu gewährleisten. Dieses Protokoll sollte Funktionen von 3GPP/IETF-Standards nutzen, z.B.: Echtzeit-Kontrollsignalisierung; Überwachung und Meldung von Leistungskennzahlen (KPI) und Anwendungsanforderungen, die dem MPF-Server helfen, fundierte Entscheidungen über das Datenverkehrsmanagement zu treffen; sowie Richtlinienimplementierung und Entscheidungslogik. Letztere sorgt für eine effiziente dynamische Instanzierung und Parametrisierung, wodurch die Nutzung von Mehrwegeprotokollen und deren inhärenter Fähigkeiten optimiert wird, um die Anforderungen der Anwendungen so weit wie möglich zu erfüllen. Ein solches Steuerprotokoll muss diese Funktionen durch Erkennung, Einrichtung und Informationsaustausch erleichtern, um robuste, skalierbare und sichere Multipath-Management-Lösungen zu liefern. Im Rahmen von 5G-RACOM wird ein Konzept für ein Multipath-Kontrollprotokoll entwickelt, dessen Implementierung jedoch nicht Bestandteil des Projekts ist.

5 Felderprobung

Die Feldstudie, die Test- und Demonstrationsfahrten umfasst, wird im „Digitalen Testfeld Bahn“ der Deutschen Bahn AG (DB) im Erzgebirge

erweitert, indem es die Zuverlässigkeit durch Aggregieren mehrerer Pfade, die nahtlose Failover-Fähigkeiten bieten, erhöht. Allerdings können die Kontrollmechanismen der Pfade nicht ausgeschaltet werden.

- MP-QUIC ist auf dem modernen QUIC-Protokoll basierend, das inhärent niedrige Latenzzeiten und eine bessere Leistung für HTTP/3-Traffic unterstützt. Es ist entwickelt, um Multipath-Operationen effizient zu handhaben und Warteschlangenblockierungen in TCP zu reduzieren. MP-QUIC verwendet unabhängige Sequenznummern für verschiedene Pfade, die eine effiziente Neuordnung und Reduzierung der Latenzzeit ermöglichen. Allerdings ist MP-QUIC noch in der Entwicklungsphase und wird möglicherweise noch nicht umfassend unterstützt. Zudem bestehen Probleme mit verschlüsselter Paketprüfung und Handhabung durch Middleboxes.

Um eine dynamisch verwaltete MPF-Lösung für das hybride FRMCS-Netz zu implementieren, könnte ein **Kontrollprotokoll**, wie in Bild 3 dargestellt und von der FRMCS SRS der UIC über den FSMPPM-Referenzpunkt definiert, zwischen MPF-Client und -Server erforderlich werden, um eine nahtlose Mehrwegeverbindung sowie ein sicheres und effizientes Mehrwege-Management zu gewährleisten. Dieses Protokoll sollte Funktionen von 3GPP/IETF-Standards nutzen, z.B.: Echtzeit-Kontrollsignalisierung; Überwachung und Meldung von Leistungskennzahlen (KPI) und Anwendungsanforderungen, die dem MPF-Server helfen, fundierte Entscheidungen über das Datenverkehrsmanagement zu treffen; sowie Richtlinienimplementierung und Entscheidungslogik. Letztere sorgt für eine effiziente dynamische Instanzierung und Parametrisierung, wodurch die Nutzung von Mehrwegeprotokollen und deren inhärenter Fähigkeiten optimiert wird, um die Anforderungen der Anwendungen so weit wie möglich zu erfüllen. Ein solches Steuerprotokoll muss diese Funktionen durch Erkennung, Einrichtung und Informationsaustausch erleichtern, um robuste, skalierbare und sichere Multipath-Management-Lösungen zu liefern. Im Rahmen von 5G-RACOM wird ein Konzept für ein Multipath-Kontrollprotokoll entwickelt, dessen Implementierung jedoch nicht Bestandteil des Projekts ist.

5 Field experiments

The field study, encompassing testing and demonstration events, will take place at Deutsche Bahn AG's (DB) "Digitales Testfeld Bahn" testbed situated in the Ore Mountain region of eastern Germany (fig. 6). The testbed stretches over 25 kilometres of track in a rural and moderately hilly terrain and links the cities of Schwarzenberg and Annaberg-Buchholz. 5G coverage along the tracks is pro-

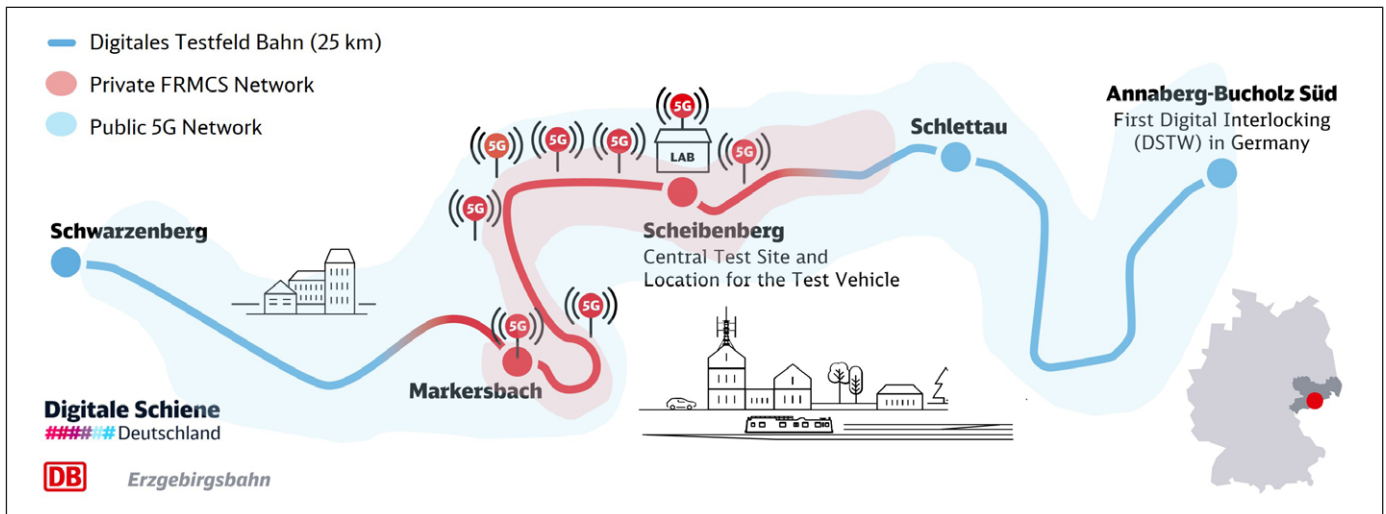


Bild 6: 5G-RACOM-Testumgebung im "Digitalen Testfeld Bahn", Erzgebirge / Deutschland

Fig. 6: 5G-RACOM test environment at the "Digitales Testfeld Bahn", Ore Mountains / Germany

Quelle / Source: DB

birge stattfinden (Bild 6). Das Testfeld umfasst 25 Streckenkilometer zwischen den Städten Schwarzenberg und Annaberg-Buchholz und verläuft über leicht hügeliges Terrain. Entlang der Gleise wird die 5G-Abdeckung sowohl von der DB (IM 5G System) als auch von Vodafone (PMNO 5G System) bereitgestellt. Vodafone unterstützt die 5G-RACOM-Tests als Teil einer 5G-Forschungsinfrastruktur der Technischen Universität (TU) Chemnitz.

Die DB stellt ein privates 5G-SA-basiertes FRMCS-Netz bereit, das vorläufig auf 3,7 GHz (TDD-Band n78) betrieben wird und ca. 10 km der Teststrecke zwischen den Orten Schlettau und Markersbach abdeckt. Zum Zeitpunkt der geplanten Feldversuche werden noch keine Testgeräte im angestrebten FRMCS-Spektrum bei 900/1900 MHz verfügbar sein.

Die Chemnitz und Vodafone stellen eine öffentliche 5G-Netzabdeckung entlang der gesamten 25 km langen Teststrecke über mehrere Frequenzbänder bereit: 700 MHz (FDD-Band n28), 1800 MHz (FDD-Band n3) und 3400 MHz (TDD-Band n78). Das öffentliche Netz nutzt Edge-Core-Funktionen, um einen Teil des kommerziellen 5G-SA-Netzes von Vodafone als eigene Netzwerk-Slice zu betreiben.

Beide Netze werden von lokalen Rechenzentren aus betrieben, welche über Glasfaser miteinander verbunden sind und so Datenübertragungen mit geringer Latenz und hoher Kapazität gewährleisten. Im Rahmen des Projekts wird die hybride Netzumgebung mit einem MPF-Server von Kontron Transportation und mit Testlösungen der TU Ilmenau und TU Chemnitz erweitert, wobei der Schwerpunkt auf e2e-Leistungsmessungen liegt. Die Testzüge werden mit einem Onboard-Gateway einschl. MPF-Client von Funkwerk ausgestattet, um die Interoperabilität zwischen MPF-Client und MPF-Server von zwei verschiedenen Anbietern zu validieren.

Die Feldstudie wird sich sowohl auf die Funktionsprüfung als auch auf Leistungsmessungen konzentrieren, um die erwarteten Vorteile der Multipath-Funktionalität in hybriden FRMCS-Netzen zu validieren und einen Leistungsvergleich der verschiedenen Mehrwegeprotokolle für TCP- und UDP-basierten Verkehr durchzuführen.

6 Ausblick

Das Projekt 5G-RACOM ebnet den Weg für den zukünftigen Bahnfunk, indem es fortschrittliche 5G-Technologien und hybride FRMCS-Netze mit mehrwegefähigen Übertragungen einsetzt. Die

vided by both DB (an IM 5G System) and Vodafone (a PMNO 5G System). Vodafone supports the 5G-RACOM tests in its capacity as part of the Wireless Research Infrastructure of the Chemnitz Technical University (TU).

DB's deployment includes a private 5G, SA-based FRMCS network that is provisionally operated at 3.7 GHz (TDD band n78) and covers around 10 kilometres of the test track between the towns of Schlettau and Markersbach. Notably, radio equipment for test operations in the targeted FRMCS bands of 900/1900 MHz is not yet available at the time of the 5G-RACOM field experiments.

The Chemnitz TU and Vodafone provide public 5G network coverage along the entire 25-kilometer test track. This network operates across multiple frequency bands: 700 MHz (FDD band n28), 1800 MHz (FDD band n3) and 3400 MHz (TDD band n78). The public network utilises edge core functions to run a mobile private network (MPN) slice of Vodafone's commercial 5G SA network. Both networks are operated from local data centres connected by optical fibre, thereby ensuring data transmissions with low latency and high capacity.

As part of the project, the hybrid network environment will be enhanced with an MPF Server provided by Kontron Transportation and with testing solutions provided by the Ilmenau TU and Chemnitz TU that focus on e2e-performance measurement. The test trains will be equipped with an Onboard Gateway, including an MPF Client provided by Funkwerk. The setup allows to validate the interoperability between the MPF client and the MPF server from two different vendors.

The field study will focus on both functional testing and performance measurement in order to validate the anticipated benefits of the multipath functionality in the hybrid FRMCS networks and to benchmark the performance of different multipath protocols for both TCP and UDP based traffic.

6 Outlook

The 5G-RACOM project aims to pave the way for the future of railway communications by leveraging advanced 5G technologies and hybrid FRMCS networks using multipath-enabled transmissions. Implementing multipath protocols is essential for achieving resilient, high-performance communication and service continuity. The project will continue with the

Einführung von Multipath-Protokollen ist für eine resiliente, leistungsstarke Kommunikation und die Kontinuität von Diensten sinnvoll. Das Projekt wird die Implementierung und Erprobung der definierten Lösung fortsetzen, wobei technische MPF-Fähigkeiten erforscht und weiterentwickelt werden, um verschiedene Anwendungsfälle zu unterstützen und die erfolgreiche Einführung und den Betrieb von FRMCS sicherzustellen. Die Erkenntnisse aus Feldtests sowie die konzeptionellen Arbeiten zur Definition von Mehrwege-Kontrollprotokollen werden das Verständnis für die zukünftige Entwicklung und Standardisierung von Eisenbahnkommunikationssystemen schärfen. 5G-RACOM hat bereits und wird weiterhin Architektur- und Protokollvorschläge in den FRMCS-Spezifikationsprozess der UIC und die ETSI-Standardisierungsgremien einbringen. ■

implementation and testing of the defined solution, exploring and refining the technical MPF capabilities to fully support diverse use cases and ensure the successful deployment and operation of FRMCS. The findings from the planned field tests and performance measurements, as well as the conceptual work on multipath control protocol definitions, will provide valuable insights for the future development and standardisation of railway communication systems. 5G-RACOM will propose selected results to UIC's FRMCS specification process and the related ETSI standards. ■

AUTOREN | AUTHORS

Tomas Karabinos

Senior Consultant

Bayerische Funknetz GmbH, im Auftrag von / on behalf of DB InfraGO AG
Anschrift / Address: Spinnereinsel 3a, D-83059 Kolbermoor
E-Mail: tomas.karabinos-extern@deutschebahn.com

Bernd Holfeld

Lead FRMCS, Digitale Schiene Deutschland
DB InfraGO AG

Anschrift / Address: EUREF-Campus 17, D-10829 Berlin
E-Mail: bernd.holfeld@deutschebahn.com

Richard Fritzsche

Lead Connectivity Platforms, Digitale Schiene
Deutschland
DB InfraGO AG

Anschrift / Address: EUREF-Campus 17,
D-10829 Berlin
E-Mail: richard.fritzsche@deutschebahn.com

Nico Alte

Project Lead System Development
Funkwerk Systems GmbH
Anschrift / Address: Im Funkwerk 5,
D-99625 Köllda
E-Mail: nico.alte@funkwerk.com

Manfred Taferner

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

Shaik Muhammed Zubair Basha

Research Associate
Technische Universität Ilmenau
Anschrift / Address: Hans-Wehrach-Straße 1,
D-98693 Ilmenau
E-Mail: zubair.shaik@tu-ilmenau.de

Klaus Moessner

Faculty of Electrical Engineering and Information
Technology
Technische Universität Chemnitz
Anschrift / Address: Strasse der Nationen 62,
D-09110 Chemnitz
E-Mail: klaus.moessner@etit.tu-chemnitz.de

Nour Chkeri

5G Core/MCx Research Manager
SNCF Réseau
Anschrift / Address: 6 Avenue François Mitterrand,
F-93574 La Plaine St Denis Cedex
E-Mail: nour.chkeri@reseau.sncf.fr

LITERATUR | LITERATURE

- [1] 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
- [2] Mandoc, D.; Nikolopoulou, V.; Gogos, S.: "5GRAIL paves the way to the Future Railway Mobile Communication System (FRMCS)", World Congress on Railway Research, Birmingham/UK, June 2022
- [3] Commission Implementing Decision (EU) 2021/1730, Sept. 2021
- [4] Holfeld, B.; Fritzsche, R.; Karabinos, T. et al.: "The 5G-RACOM Project: 5G for Resilient and Green Rail Communications", Transport Research Arena (TRA), April 2024, Dublin
- [5] 5G-RACOM project grant agreement number: 01MJ22015, project website: <https://franco-german-5g-ecosystem.eu/5g-racom/>

safety on tracks

SCHWEIZER ELECTRONIC
60 JAHRE . YEARS . ANNÉES . ANNI

Besuchen Sie uns -
Halle 2.2 Stand 250

- Warnanlagen
- Bahnübergänge
- Funksysteme
- Innovation & Digitalisierung

schweizer-electronic.com