

# 5G-RACOM – Ergebnisse von Multipath-Protokolltests für hybride FRMCS-Netze

## 5G-RACOM: Achievements from multipath protocol testing in hybrid FRMCS networks

Tomas Karabinos | Bernd Hofeld | Arne Weber | Mainul Hassan | Kevin Wriston | Manfred Taferner | Zubair Shaik | André Apitzsch

Das deutsch-französische Innovationsprojekt 5G-RACOM wurde nach drei Jahren Laufzeit Ende 2025 erfolgreich abgeschlossen. Es lieferte Erkenntnisse, die das zukünftige Bahnfunksystem Future Railway Mobile Communication System (FRMCS) resilienter machen und eine effiziente, robuste und nachhaltige Nutzung seines Frequenzspektrums ermöglichen. Als Nachfolger von Global System for Mobile Communication-Railway (GSM-R) wird FRMCS eine leistungsstarke Echtzeitkommunikation zwischen Zug und Leitstelle auf Basis von 5G gewährleisten und so die Digitalisierung der Bahn vorantreiben. Das Projekt untersuchte hybride FRMCS-Netze, in denen der öffentliche Mobilfunk das Bahnfunksystem durch Nutzung der Mehrwegeprotokolle MP-TCP und MP-QUIC ergänzt und so als Rückfallebene oder zur Kapazitätserhöhung dient. Dieser Beitrag präsentiert Ergebnisse der Mehrwegeprotokollstudien und erweitert die in SIGNAL+DRAHT Ausgabe 9/2024 veröffentlichte Arbeit „5G-RACOM – Feldstudie zu hybriden FRMCS-Netzen für eine ausfallsichere Bahnkommunikation“ [4].

### 1 FRMCS Multipath im Rahmen des 5G-RACOM Projekts

Durch die zunehmende Digitalisierung des Bahnbetriebs werden mehr betriebsrelevante Daten in Echtzeit zwischen Zügen und Infrastruktur übertragen. Dies bringt hohe Konnektivitätsanforderungen mit sich. Das derzeitige 2G-basierte Zugfunksystem GSM-R stößt dabei an seine Grenzen – aufgrund unzureichender Kapazität und Latenz, veralteter Architektur und begrenzter Komponentenverfügbarkeit. GSM-R wird im nächsten Jahrzehnt obsolet sein. FRMCS [1] wird GSM-R ersetzen. Es basiert auf modernen 5G-Technologien und ist mit zukünftigen Mobilfunkgenerationen kompatibel. Es soll alle Kommunikationsbedürfnisse abdecken: von betriebsrelevanten Anwendungen (z. B. Zugsteuerungs- und Sicherheitssysteme) bis hin zu datenintensiven Anwendungen (z. B. Videoüberwachung, digitale Wartung). Die FRMCS-Architektur basiert auf der Trennung von Anwendung und Kommunikationssystem. Letzteres besteht aus der FRMCS-Transportschicht, die für Funkzugangs- und Kernnetze die 3GPP-standardisierte 5G SA (Standalone)-Technologie nutzt, und der FRMCS-Serviceschicht, die auf dem 3GPP-Framework für missionskritische Dienste (MCx) basiert. Die Spezifikation des FRMCS-Transport- und Servicesystems, seiner Architekturen, Schnittstellen, Funktionen und Verfahren wird von der UIC und ETSI (Europäisches Institut für Telekommunikationsnormen) im Technischen Komitee für Bahn-Telekommunikation (TC RT) vorangetrieben. Für den FRMCS-Einsatz in Europa wurden zwei Bahnfunk-(RMR)-Frequenzbänder zugewiesen – die 5G-Bänder n100 (900 MHz) und n101 (1900 MHz) [2]. Der Zu-

The Franco-German 5G-RACOM innovation project was successfully completed at the end of 2025 after approximately three years. It has provided insights that will make the Future Railway Mobile Communication System (FRMCS) more resilient and allow the efficient, robust and sustainable use of its frequency spectrum. As the successor to Global System for Mobile Communication-Railway (GSM-R), FRMCS will ensure high-performance, real-time train-to-ground communication based on 5G, thereby enabling railway digitalisation. The project has examined hybrid FRMCS networks, where public mobile connectivity utilises the capabilities of the MP-TCP and MP-QUIC multipath protocols to complement the railway radio system as a fallback level or for capacity enhancement. This article presents the results of the multipath protocol assessment and extends the work entitled “5G-RACOM – a field study into hybrid FRMCS networks for resilient rail communications” published in SIGNAL+DRAHT issue 9/2024 [4].

### 1 FRMCS multipath within the scope of the 5G-RACOM project

Railway operations are rapidly digitalising and, as a result, more operationally relevant data must be transmitted between trains and infrastructure in real time. This is associated with highly demanding connectivity requirements. As part of this development, the current 2G-based railway mobile communication system GSM-R is reaching its limits, primarily due to insufficient capacity, latency constraints, outdated architecture and declining component availability. GSM-R will become obsolete in the next decade and be replaced by FRMCS [1], which is based on modern 5G technologies and is compatible with future mobile network generations. FRMCS is intended to support all communication needs, from mission-critical applications (e.g. train control and safety systems) to data-intensive applications (e.g. video surveillance and digital maintenance). The FRMCS architecture is based on the separation of the application layer and the railway communication system, which consists of the FRMCS transport stratum, using 3GPP-standardised 5G SA (standalone) technology for the radio access and core network and the FRMCS service stratum based on 3GPP's mission critical services framework (MCx). The specifications of the FRMCS transport and service system, architectures, interfaces, functions and procedures are being driven forward by the UIC (International Union of Railways) and ETSI (the European Telecommunications Standards Institute) within the Technical Committee for Railway Telecommunications (TC RT). Two railway mobile radio (RMR) frequency bands, the n100 at 900 MHz

griff auf zusätzliche Spektren von öffentlichen Mobilfunknetzbetreibern (PMNO) wird als Ergänzung betrachtet. Während GSM-R auf dedizierter Infrastruktur basiert, unterstützt FRMCS hybride Netzwerkmodelle, die private 5G-Netze der Bahn und öffentliche 5G-Verbindungen kombinieren und die Datenübertragung über mehrere drahtlose Übertragungswege mittels der FRMCS-Multipath-Funktion (MPF) [3] ermöglichen. Entscheidend für diese Funktion ist die Verwendung von Mehrwege-Transportprotokollen wie MP-TCP und MP-QUIC. Diese wählen automatisch den optimalen Übertragungsweg in Bahn- und öffentlichen Netzen aus. Ziel ist es, eine hohe Zuverlässigkeit für bahnkritische Anwendungen zu gewährleisten sowie die Ausfallsicherheit und Verfügbarkeit der Übertragung zu erhöhen. Das von DB InfraGO und SNCF Réseau koordinierte Projekt 5G-RACOM (5G for Resilient and Green Rail COMMunications)<sup>1</sup> [4, 5] erforschte hybride FRMCS-Netzwerkarchitekturen, untersuchte potenzielle Anwendungsfälle und implementierte und demonstrierte ausgewählte Mehrwegeprotokollösungen für MPF. Weitere Projektpartner sind Funkwerk, Kontron Transportation, die TU Chemnitz und die TU Ilmenau. Die Anwendungsfälle von 5G-RACOM für hybride FRMCS-Netzwerke (siehe Tab. 1) wurden mit den in UIC- und ETSI-Spezifikationsdokumenten definierten Fällen abgeglichen.

<sup>1</sup> 5G-RACOM wurde vom dt. Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR) und dem frz. Ministerium für Wirtschaft, Finanzen und Relance (MEFR) gefördert.

and n101 at 1900 MHz 5G bands, have been allocated for FRMCS deployment in Europe [2]. Access to additional spectrum resources from public mobile network operators (PMNO) is being considered as a complement. While GSM-R relies on a dedicated infrastructure, FRMCS supports hybrid network models combining railway-operated private 5G and public 5G connectivity and allowing data transfer over multiple wireless transmission paths via the FRMCS multipath function (MPF) [3]. The use of multipath transport protocols such as MP-TCP and MP-QUIC is crucial to this function. They have been designed to automatically select the best transmission path in the railway and public networks. The goal is for the protocols to guarantee seamless operations and high reliability for railway-critical applications, while the overall resilience and availability of the transmission network should be increased. The 5G-RACOM project (5G for Resilient and Green Rail COMMunications)<sup>1</sup> [4, 5] coordinated by DB InfraGO and SNCF Réseau has researched hybrid FRMCS network architectures, studied potential use cases and implemented and demonstrated selected multipath protocol solutions for MPF. Further project partners involved in this research are Funkwerk, Kontron Transportation, TU Chemnitz and TU Ilmenau. 5G-RACOM's use cases for hybrid FRMCS networks have been aligned with those defined in the UIC and ETSI specification documents. They are highlighted in tab. 1.

<sup>1</sup> 5G-RACOM has been funded by the German Federal Ministry of Research, Technology and Space (BMFTR) and the French Ministère de l'Économie et des Finances et de la Relance (MEFR).

ID	Title	Details
UC1	Application-Specific Path Selection	By default, the PMNO network is used for less critical applications that may not use FRMCS.
UC2	Resilience via fallback	If the FRMCS network becomes unavailable due to any failures or unintended coverage holes, the PMNO network takes over.
UC3	Resilience via Best Path Selection	If the FRMCS network quality is poor (QoS is not fulfilled), some data flows are switched to the PMNO network.
UC4	Resilience via Packets Replication	If the FRMCS network quality is poor (QoS is not fulfilled), some data flows are duplicated to the PMNO network.
UC5	Coverage Extension	If the FRMCS network coverage ends (intentionally) because the track is not (yet) equipped with FRMCS, the PMNO network takes over temporarily.
UC6	Capacity Extension	If the capacity (data rate) of the FRMCS network is insufficient, the PMNO network complements it.

Tab. 1: 5G-RACOM Anwendungsfälle

Tab. 1: 5G-RACOM use cases

Quelle / Source: DB

## 2 Prinzipien der Mehrwegeübertragung und Projektarchitektur

Die Multipath-Funktionalität in FRMCS wird in einem Client-Server-Gateway-Modell implementiert, wobei ein MPF-Client Gateway (GW) auf der Fahrzeugseite (OB) und ein MPF-Server Gateway auf der Streckenseite (TS) zum Einsatz kommen. MPF stellt i.d.R. eine OSI-Layer-4-Multipath-Transportverbindung zwischen OB- und TS-Komponenten her und ermöglicht so folgende Übertragungen von Datenverkehr :

- Umleitung zum bevorzugten Netzwerk
- schneller Wechsel bei Ausfall eines Pfades oder Leistungsverschlechterung
- sofern unterstützt, Aufteilung, Aggregation oder Replikation des Datenverkehrs über verschiedene Pfade.

Wie das öffentliche 5G-Transportnetz, das den alternativen Übertragungspfad bereitstellt, in das FRMCS-Transportnetz auf niedrigeren OSI-Schichten integriert wird, ist eine gesonderte Frage. Dies kann über eine FRMCS/PMNO 5G-Core-Verbindung in einem National-Roaming-Modell, über die Integration des PMNO-RAN in das FRMCS-Core in einem Multi-Operator-Core-Network (MOCN) Sche-

## 2 Multipath principles and project architecture

The multipath functionality in FRMCS will be implemented in a traditional client-server gateway (GW) model, using the MPF client GW at the onboard side (OB) and MPF server GW at the trackside (TS). In general, MPF establishes an OSI layer 4 multipath transport connection between these OB and TS components, thus allowing the traffic to be:

- steered to the preferred network,
- switched quickly when one path becomes unavailable or performance degrades,
- and, where supported, split, aggregated or replicated across paths.

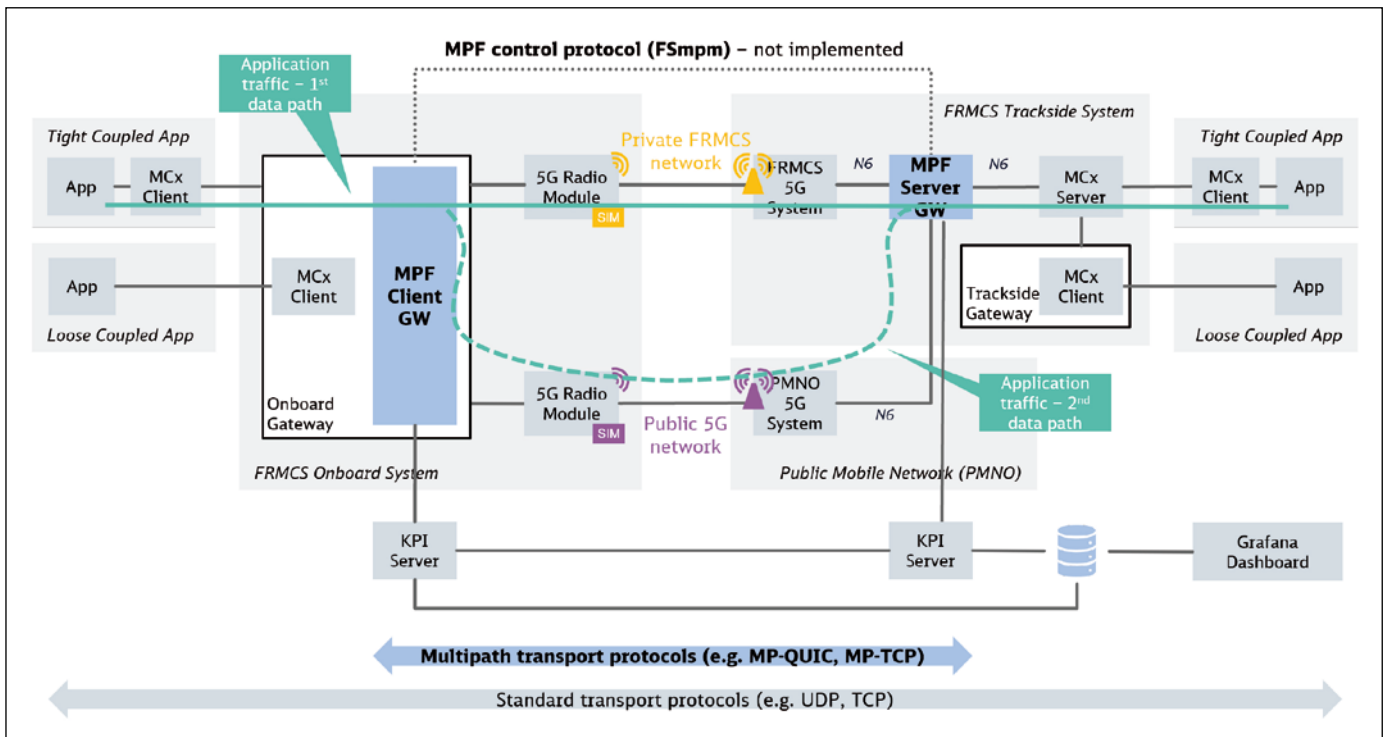
The way the public 5G transport network, which provides the alternative transmission path, is integrated into the FRMCS transport on the lower OSI layers is a separate question. This can be achieved using a FRMCS/PMNO 5G Core interconnection in an FRMCS National Roaming model, via PMNO RAN integration into the FRMCS Core in an Multi-Operator Core Network (MOCN) scheme or via subscription-based access us-

ma oder über einen SIM-Karten-Abonnement-basierten Zugriff mit zwei separaten, d.h. nicht miteinander verbundenen 5G-Transportnetzketten, erfolgen. Architektonisch ermöglicht das hybride FRMCS-Netzwerk die Verfügbarkeit mehrerer Transportnetze, während MPF die verfügbaren Netze nutzt und den Mechanismus bereitstellt, um mehrere Datenpfade parallel zu verwenden oder mit reduzierter Dienstunterbrechung zwischen ihnen zu wechseln. Daher können hybride FRMCS-Architekturen mit MPF prinzipiell alle Anwendungsfälle der Tab. 1 unterstützen. Architekturen mit Multipath-Funktion bieten in der Regel Vorteile für die Switching-Performance: Anstatt sich auf einen einzelnen Träger zu verlassen und den Transport-/Anwendungszustand „neu aufzubauen“, kann Multipath eine logische Verbindung aufrechterhalten und gleichzeitig den darunter liegenden aktiven Datenpfad anpassen.

5G-RACOM nutzt ein abonnementbasiertes Hybridmodell als praktische und kontrollierbare Grundlage für F&E-Tests des Verhaltens von Mehrwege-Transportprotokollen, der Interoperabilität und der Umschalt-/Wiederherstellungsleistung unter realistischen Mobilitätsbedingungen. Das private FRMCS-Netzwerk und das öffentliche 5G-Netzwerk bleiben betrieblich unabhängig, einschließlich gesonderter Zugänge/SIM-Karten-Abos. Der Hybridaspekt wird durch die Bereitstellung von zwei unabhängigen Pfaden für MPF realisiert (die prinzipiell auch andere Zugangsarten wie WLAN und Satellit simulieren können). Ausgewählte Mehrwege-Transportprotokolle, darunter MP-QUIC [6] und MP-TCP [7], werden innerhalb der MPF-Gateways verwendet, um eine einzige logische Sitzung aufzubauen und aufrechtzuerhalten. Diese kann den Datenverkehr über beide Pfade steuern, umschalten, aufteilen, aggregieren und replizieren. Für Anwendungen sind die Mehrwegemechanismen transparent. Sie verwenden weiterhin herkömmliche Transportprotokolle wie TCP oder UDP. Die Prototyp-Implementierung von 5G-RACOM integriert MPF nicht mit einer Policy Control Funktion (PCF) oder durchgängiger QoS-gesteuerten Orchestrierung. Sie implementiert auch keine dynamische Richtlinienverwaltung zwischen Onboard- und Trackside-

ing two separate, i.e. non-interconnected, 5G transport network chains. From an architectural perspective, this means that hybrid FRMCS network access provides the availability of multiple data paths, while MPF exploits the multiple available networks and provides the mechanism to use the multiple data paths in parallel or to transition between them with reduced service interruptions. As a result, hybrid FRMCS architectures with MPF can in principle support the full set of use cases in tab. 1. Multipath-enabled architectures are typically assessed as offering better switching performance potential: instead of relying on a single bearer and “rebuilding” the transport/application state after a change, multipath can preserve a logical connection while adapting the active data path set underneath.

5G-RACOM has adopted a subscription-based hybrid network model as a practical and controllable baseline for the R&D testing. This allowed the study of the multipath transport protocol behaviour, interoperability and switching/recovery performance under realistic mobility conditions. The private FRMCS network and public 5G network remain operationally independent, including separate access/SIM card subscriptions. The hybrid aspect is realised by providing MPF with two independent paths (which could, in principle, also mimic other access types such as Wi-Fi and satellite). Selected multipath transport protocols, including MP-QUIC [6] and MP-TCP [7], are used within the MPF GWs to establish and maintain a single logical session that can steer, switch, split, aggregate and replicate data traffic across both paths. The applications remain unaware of the multipath mechanisms and continue to use conventional transport protocols such as TCP or UDP. The 5G-RACOM prototype-grade implementation does not integrate MPF with 5G’s policy function (PCF) and end-to-end Quality-of-Service (QoS) driven orchestration. It also does not implement dynamic policy exchange and management between onboard and trackside MPF GWs over the FSmpm interface as proposed in the



**Bild 1: Hybride FRMCS-Netzwerkarchitektur im 5G-RACOM-Projekt**

Fig. 1: A hybrid FRMCS network architecture for the 5G-RACOM project

Quelle / Source: DB

MPF-Gateways über die FSmpm-Schnittstelle, wie in der ETSI-Standardisierung vorgeschlagen. Richtlinien in 5G-RACOM werden primär auf der Onboard-Seite vorkonfiguriert. Darüber hinaus realisiert die 5G-RACOM-Architektur Monitoringfunktionen, um verschiedene Key Performance Indikatoren (KPI) in Echtzeit durch die Beobachtung von Datenpaketen auf den MPF-Schnittstellen zu messen. Aus diesen Paketen berechnet das Tool KPI für jeden Pfad, der an den Mehrwegedatenkommunikationsprotokollen beteiligt ist, und unterstützt die Visualisierung zur Auswertung und Fehlerbehebung. Das KPI-Überwachungsframework wurde von der TU Ilmenau implementiert.

**3 Implementierung der Multipath-Transportprotokolle**

Wie in [4] berichtet, führte das 5G-RACOM-Projekt eine umfassende Bewertung geeigneter Mehrwegeprotokolle für Implementierung und Tests durch. Dabei wurden 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 (MPUDP), Software-Defined Wide Area Network (SD-WAN) und Load Balancing-Based IP Routing berücksichtigt. Schließlich wurden die Protokolle MP-TCP und MP-QUIC ausgewählt. Bei MP-QUIC sind Bibliotheksreife, Funktionsumfang und Interoperabilitätsanforderungen für die Implementierungsaufwände zu berücksichtigen. MP-TCP hingegen bot eine vergleichsweise ausgereifte Basis für die Mehrwegeimplementierung (einschließlich bewährter Kernel-Grundlagen in vielen Umgebungen) und eignete sich gut als Vergleichsreferenz. Ein Vergleich der beiden ausgewählten Mehrwegeprotokolle ist in Bild 2 dargestellt.

Die 5G-RACOM-Partner Funkwerk und Kontron untersuchten verfügbare MP-QUIC-Stacks sowie deren Integrationsaspekte eingehend und validierten die Machbarkeit durch interne Labortests, bevor sie sich für die Entwicklung von Prototypen für Feldtests entschieden. Basierend darauf wählte Funkwerk die TQUIC-Bibliothek und Kontron die Picoquic-Bibliothek. Während der Implementierung zeigte sich, dass sich die ausgewählten MP-QUIC-Stacks hinsichtlich der unterstützten QUIC-Funktionen und des Reifegrads ihrer Erweiterungen unterschieden. Ein Unterschied ist die Unterstützung des Datagram- und / oder Streaming-Modus.

ETSI standardisation. The policies in 5G-RACOM have been primarily preconfigured on the onboard side. Moreover, the 5G-RACOM architecture performs KPI monitoring capabilities so as to measure various Key Performance Indicators (KPI) in real-time by observing data packets at the MPF interfaces. The tool uses these packets to calculate the KPI for each path involved in the multipath communication protocols and supports visualisation for evaluation and troubleshooting. The KPI monitoring framework has been implemented by TU Ilmenau.

**3 Implementing the Multipath transport protocol**

As reported in [4], a thorough analytical assessment of the suitable multipath protocols for implementation and testing was performed at the start of the 5G-RACOM project. It included Multipath TCP (MP-TCP), Multipath QUIC (MP-QUIC), Stream Control Transmission Protocol (SCTP) with Concurrent Multipath Transfer (CMT), the Multipath Datagram Congestion Control Protocol (MP-DCCP), Multipath UDP (MPUDP), the Software-Defined Wide Area Network (SD-WAN) and Load Balancing-Based IP Routing candidates. The MP-TCP and MP-QUIC protocols were eventually selected as the best suitable candidates. Library maturity, feature completeness and interoperability constraints were expected to dominate the implementation efforts pertaining to MP-QUIC. By contrast, MP-TCP provided a comparatively mature multipath implementation baseline (including proven kernel-level foundations in many environments), making it well suited as a comparative reference point. A comparison of both the selected multipath protocols is shown in fig. 2.

The 5G-RACOM partners, Funkwerk and Kontron, performed deeper investigations into the available MP-QUIC stacks as well as their integration aspects and validated its feasibility through internal lab trials before committing to deployment-grade prototypes. Based on these investigations, Funkwerk selected the TQUIC library and Kontron selected the Picoquic library for its MP-QUIC-based implementation. During implementation, it became clear that the selected MP-QUIC stacks differed in the supported QUIC features and extension maturity. One aspect within this context involves the support for datagram and / or streaming mode.

	<b>MP-TCP (Multipath TCP)</b>	<b>MP-QUIC (Multipath QUIC)</b>
<b>Pros</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Standardised (RFC 8684), widely supported</li> <li>Ensures reliable delivery – suited for ETCS, ATO, signalling</li> <li>Supports aggregation/splitting</li> <li>Fallback to legacy TCP ensures backward compatibility</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Supports both reliable and unreliable traffic (TCP-like + UDP)</li> <li>Built-in TLS → secure by default</li> <li>Efficient ACK handling reduces overhead</li> <li>Suited for real-time rail applications</li> <li>Flexible path management splitting, aggregation, replication</li> </ul>
<b>Cons</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Only supports reliable TCP traffic – less suited to low-latency applications</li> <li>Replication not natively supported</li> <li>Complexity when deployed with proxies in FRMCS gateways</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Still under standardisation (IETF draft stage)</li> <li>Open-source stacks vary in maturity &amp; completeness</li> </ul>

**Bild 2: Vergleich von MP-TCP und MP-QUIC**

Fig. 2: A comparison of MP-TCP and MP-QUIC

Quelle / Source: DB

- Der Datagram-Modus (DM) in MP-QUIC behandelt jede Dateneinheit als unabhängige Nachricht ohne inhärente Reihenfolge- oder Zuverlässigkeitsgarantien. Er ermöglicht die Übertragung mit geringer Latenz ohne Verzögerungen durch erneute Übertragung und reduzierten Overhead.
- Der Streaming-Modus (SM) in MP-QUIC ermöglicht die zuverlässige, geordnete Übertragung kontinuierlicher Byte-Ströme mit automatischer erneuter Übertragung, Flusssteuerung und Verbindungssemantik. Diese Eigenschaften könnten jedoch auch durch Anwendungsschicht- und Ende-zu-Ende-Transportprotokolle realisiert werden.

Im Rahmen von 5G-RACOM beeinträchtigte die fehlende Datagram-Unterstützung von TQUIC die Implementierung der MP-QUIC-Tests. Für die MPF-Studien wurde folgende pragmatische Aufteilung gewählt:

- **MP-QUIC Interoperabilitäts-(IOP)-Feldtests im Streaming-Modus** zwischen Funkwerk (MPF-Client-GW) und Kontron (MPF-Server-GW). Beide implementierten HTTP/3-Verbindungen über QUIC/UDP und nutzten eine Richtlinienkonfigurationsdatei am MPF-Client-GW.
- **MP-QUIC Ende-zu-Ende-(E2E)-Feldtests im Datagram-Modus** durch Kontron (MPF-Client- und -Server-GW).
- **MP-QUIC Ende-zu-Ende-(E2E)-Labortests im Streaming-Modus** durch Funkwerk (MPF-Client- und -Server-GW).
- **MP-TCP Ende-zu-Ende-(E2E)-Feldtests** durch Kontron (MPF-Client- und -Server-GW).

#### 4 Testumgebung

Die Erprobung des 5G-RACOM-Ansatzes erfolgte auf der DB-Teststrecke im „Digitalen Testfeld Bahn (DTB)“ im Erzgebirge. Das DTB erstreckt sich über 25 km zwischen Schwarzenberg und Annaberg-Buchholz. Die Strecke bietet eine kontrollierte Umgebung für Testfahrten außerhalb des Regelbetriebs, bspw. mit dem Labor-ICE „Advanced Train Lab“ der DB.

Die FRMCS-Infrastruktur nutzt acht Funkstandorte auf einem 10 km langen Abschnitt sowie ein Serverlabor am Bahnhof Scheibenberg. Dort befinden sich alle zentralen Komponenten des privaten FRMCS-Netzwerks: 5G-SA-Transport von Nokia und DB InfraGO, der vorläufig auf 3700 MHz (n78) betrieben wird, MCx-Service-Equipment von Kontron sowie das MPF-Server-Gateway von Kontron. Dieses FRMCS-Netzwerk diente als primärer Datenpfad für die FRMCS-Multipath-Tests. Es wurde auf IPv4-Adresspools aufgebaut, wobei Onboard-Komponenten von Funkwerk und Kontron statische Adressen erhielten und sich über einen DNN anschlossen, was eine wiederholbare Tunnel-/Routing-Konfiguration über Test Sessions hinweg ermöglichte.

Das PMNO-Netzwerk wurde von Vodafone im Rahmen einer Forschungsinfrastruktur der TU Chemnitz bereitgestellt. Es besteht aus 24 Basisstationen, die das Testgebiet abdecken und in den Frequenzbändern 700 MHz (n28) und 1800 MHz (n3) sowie im 3400-MHz-Spektrum (n78) betrieben werden. Letzteres wird in der Nähe der Bahnhöfe Schlettau und Annaberg-Buchholz bereitgestellt, um höhere Kapazitäten zu ermöglichen. Eine lokale Instanz der Edge User Plane Function (UPF) des 5G-Kernnetzes wurde in Einrichtungen der TU Chemnitz in Annaberg-Buchholz realisiert. Vodafone stellte eine kundenspezifischen Ende-zu-Ende-Slice mit einem dedizierten DNN und IP-Adresspool bereit. Dieser war ausschließlich im DTB-Gebiet verfügbar und terminierte auf der lokalen UPF.

Die FRMCS-PMNO-Netzwerkverbindung basierte auf einer dedizierten IP-Verbindung und unterstützte die 5G-Benutzerebene

- The datagram mode (DM) in MP-QUIC treats each data unit as an independent message with no inherent ordering or reliability guarantees. It provides low-latency delivery without any retransmission delays and with reduced protocol overheads.
- The streaming mode (SM) in MP-QUIC provides the reliable, ordered delivery of continuous byte streams with automatic retransmission, flow control and connection semantics. However, these attributes could also be fulfilled by the application layer and end-to-end transport protocols.

TQUIC's current lack of datagram mode support impacted the implementation for MP-QUIC testing in 5G-RACOM. Overall, the following pragmatic split for multipath studies has been chosen:

- **Interoperability (IOP) field testing of the MP-QUIC solution with the streaming mode** between Funkwerk (the onboard MP client GW) and Kontron (the trackside MPF server GW). Both implemented HTTP/3 connections running over QUIC/UDP and employed a policy configuration file at the MP client GW.
- **End-to-End (E2E) field testing of the MP-QUIC solution with the datagram mode** by Kontron (the MP client and server GWs).
- **End-to-End (E2E) lab testing of the MP-QUIC solution with the streaming mode** by Funkwerk (the MP client and server GWs).
- **End-to-End (E2E) field testing of MP-TCP solution** by Kontron (the MP client and server GWs).

#### 4 Test deployment

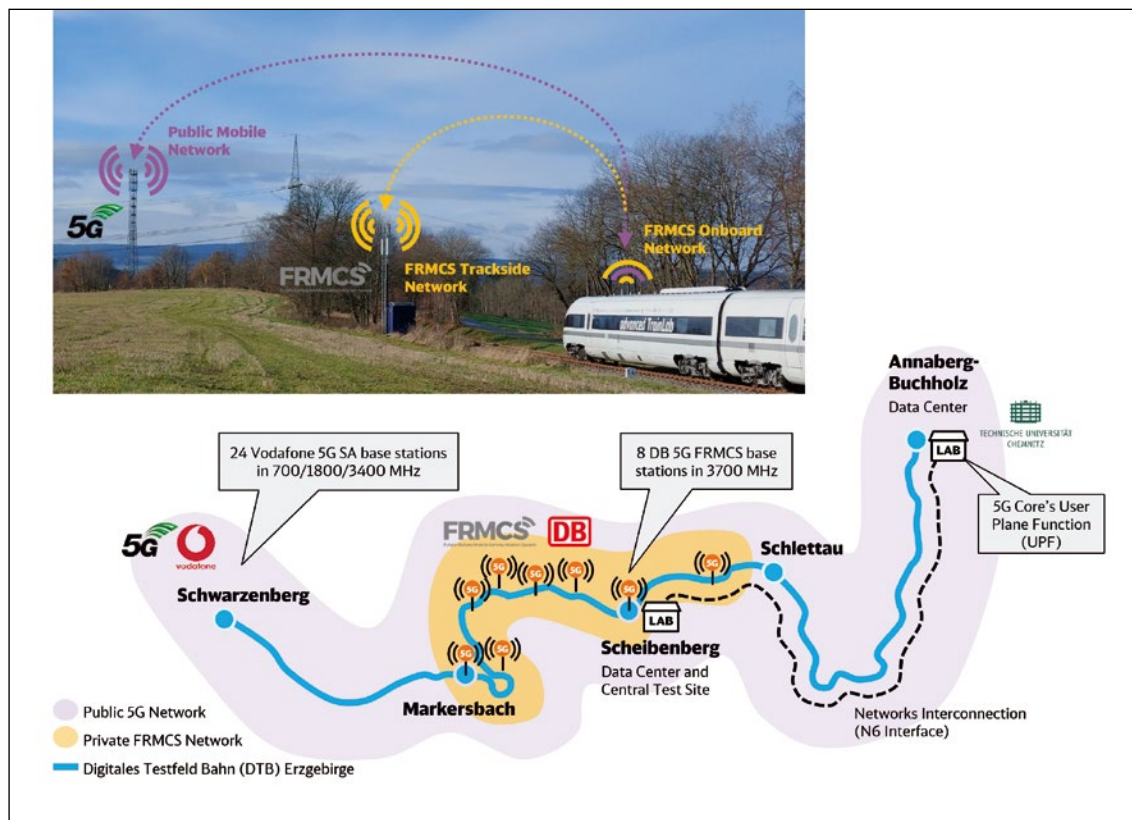
The hybrid 5G-RACOM field deployment was realised at DB's "Digitales Testfeld Bahn (DTB)" test track in the Ore Mountains, Germany. The DTB corridor stretches between the towns of Schwarzenberg and Annaberg-Buchholz over a length of 25 km. It has no regular train services and provides a controlled environment for executing non-operational drive tests, e.g. conducted with DB's experimental ICE "advanced train lab".

The FRMCS infrastructure uses eight radio sites on a 10 km section and a server laboratory at Scheibenberg station, hosting all the central components of the private FRMCS network: 5G SA transport supplied by Nokia and DB InfraGO and provisionally operated at 3700 MHz (n78), MCx service equipment provided by Kontron and the MPF Server GW deployed by Kontron. This FRMCS network served as the primary data path for FRMCS multipath testing. It was built on IPv4 address pools with OB train devices from Funkwerk and Kontron obtaining static addresses and attaching using a test data network name (DNN), thus enabling repeatable tunnel/routing configuration across test sessions.

The PMNO network was provided by Vodafone as part of the Wireless Research Infrastructure of the TU Chemnitz. The network consists of 24 base stations that cover the test area, operated in the 700 MHz (n28) and 1800 MHz (n3) frequency bands and the 3400 MHz (n78) spectrum which is supplied near the railway stations of Schlettau and Annaberg-Buchholz so as to support higher-capacity conditions. A local edge user plane function (UPF) instance of the 5G Core has been realised at the TU Chemnitz facilities in Annaberg-Buchholz. Vodafone provided a custom end-to-end slice associated with a dedicated DNN and IP address pool. It was only available in the DTB area and terminated on the local UPF.

The FRMCS-PMNO network interconnection setup relied on a dedicated IP interconnection supporting the 5G user plane via only an N6 interface without extending any control plane functions between the domains.

The network characteristics and coverage of both the private FRMCS and the public 5G transport domains were measured during the initial test weeks. In order to prepare for the MPF field-test-



**Bild 3: Hybride FRMCS-Testumgebung im „Digitalen Testfeld Bahn“, Erzgebirge / Deutschland**

Fig. 3: The hybrid FRMCS test deployment at the “Digitales Testfeld Bahn”, Ore Mountains / Germany

Quelle / Source: DB

ausschließlich über die N6-Schnittstelle, ohne Steuerungsfunktionen zwischen den Domänen zu erweitern.

Netzwerkeigenschaften und die Abdeckung privater FRMCS- und öffentlicher 5G-Transportnetze wurden in den ersten Testwochen gemessen. Zur Vorbereitung der MPF-Feldtests wurden mehrere Streckenabschnitte identifiziert, die repräsentative und reproduzierbare Bedingungen boten, z. B. stabile Abdeckung, Phasen der Verschlechterung und kontrollierte Abdeckungslücken für den Netzübergang. Die Feldvalidierung des MPF wurde in Funktionstests unter stationären Bedingungen und Leistungsvergleiche mit Mobilität unter Fahrbedingungen unterteilt. Letztere konzentrierte sich auf mehrere KPI, darunter:

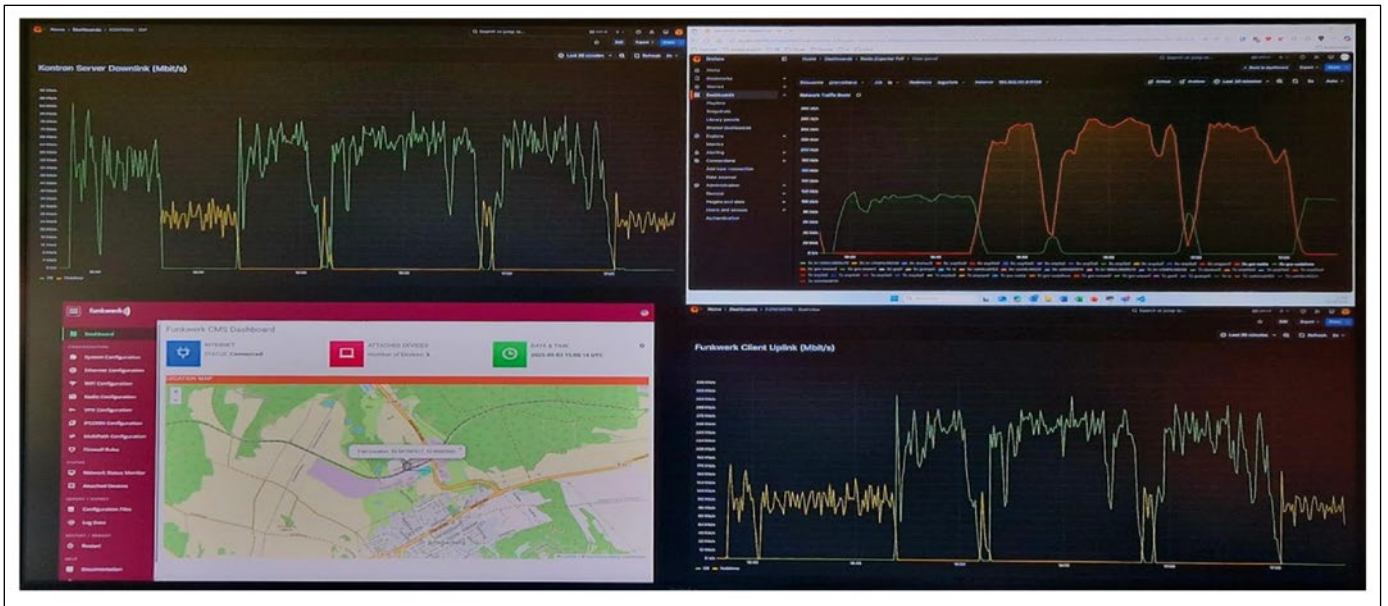
- Umschalt-/Wiederherstellungszeit und -verhalten bei Übergängen von Datenpfaden, was für Ausfallsicherheit und Fallback von zentraler Bedeutung ist;
- Datendurchsatz, wobei insbesondere der kombinierte Durchsatz und die Beiträge pro Datenpfad für Aggregations- und Aufteilungsszenarien berücksichtigt wurden;
- Latenz und Round-Trip-Time (RTT) zur Interpretation der Reaktionsfähigkeit und zur Erklärung von Steuerungs-/Scheduling-Entscheidungen;
- Paketverlust-/Fehlerrate und Retransmissions zur Bewertung der Robustheit, zur Interpretation von QoE-Auswirkungen und zum Verständnis des Kompromisses zwischen Zuverlässigkeit und Overhead;
- Session-Stabilität und -kontinuität bei Mobilitätsereignissen und Abdeckungsänderungen, einschl. des Vorhandenseins/Nichtvorhandenseins von für Anwendungen sichtbaren Unterbrechungen (Timeouts, Wiederverbindungen, Pufferereignisse).

Vergleichsläufe wurden mit MP-QUIC, MP-TCP und Single-Path als Baseline durchgeführt. Wichtige Variablen wurden systematisch verändert, um den Einfluss einzelner Faktoren zu isolieren. Zu den wichtigsten Konfigurationsvariablen gehörten die Generierung

ing activities, several track segments were identified that provided representative and repeatable conditions, e.g. stable coverage, degradation phases and controlled coverage gaps for network transition. The MPF field validation was classified into functional tests under stationary conditions and performance benchmarking with mobility under drive test conditions. The latter focused on several KPI, including

- the switchover/recovery time and behaviour for multipath data flow transitions, which is central to the resilience and fallback objectives,
- the throughput, where the combined throughput and per data path contributions were particularly considered for aggregation and splitting scenarios,
- the latency and round-trip time (RTT) to interpret the responsiveness and explain the steering/scheduling decisions,
- the packet loss/error rate and retransmissions to assess the robustness, interpret the QoE impacts and understand the trade-off between reliability and overhead,
- the session stability and continuity in the case of any mobility events and coverage changes, including the absence/presence of any application-visible interruptions (timeouts, reconnects, buffering events).

Comparative runs have been performed across MP-QUIC, MP-TCP and baseline single-path transport. The key variables were systematically changed to isolate the effects of any individual factors. The major configuration variables included application pattern generation (e.g. ETCS/ATO-like small-packet size traffic, iPerf/iPerf3 continuous traffic and the TCP/UDP transport payload type), uplink vs downlink transmission direction and active or backup data path selection (i.e. FRMCS with public 5G backup and vice versa). The performance data from the MPF client GW (OB) and the MPF server GW (TS) has been visualised in real-time via TU Ilmenau's KPI monitoring tool; see fig. 4.



**Bild 4: KPI Monitoring Dashboard im Zug**  
 Fig. 4: The in-train KPI monitoring dashboard

Quelle / Source: DB/TU Ilmenau

von Anwendungsmustern (z.B. ETCS/ATO-ähnlicher Datenverkehr mit kleiner Paketgröße, kontinuierlicher iPerf/iPerf3-Datenverkehr, TCP/UDP-Transport-Payload), die Übertragungsrichtung (Uplink vs. Downlink) sowie die Auswahl des aktiven oder Backup-Datenpfads (d.h. FRMCS mit öffentlichem 5G-Backup und umgekehrt). Die Leistungsdaten des MPF-Client-Gateways (OB) und des MPF-Server-Gateways (TS) wurden in Echtzeit mit dem KPI-Monitoring-Tool der TU Ilmenau visualisiert (Bild 4).

**5 Projektergebnisse**

5G-RACOM hat die Ende-zu-Ende-Machbarkeit der Multipath-Funktionalität für FRMCS in einem hybriden FRMCS-Feldsetup nachgewiesen. Das Projekt konnte die Steuerung und Umschal-

**5 The key achievements**

5G-RACOM has proven the end-to-end feasibility of multipath functionality for FRMCS in a realistic hybrid FRMCS setup. The project has been able to verify steering and switching as the primary operating capabilities and validated the aggregation and splitting. All the key FRMCS multipath capabilities were exercised across the work, while UC4 “resilience via replication”, which uses duplication, was lab tested rather than field tested. All the other use cases (UC1, UC2, UC3, UC5, UC6) have been successfully tested in the field; see fig. 5 for details. The project has proven the breadth of multipath protocol implementations and interoperability progress. MP-TCP, as a multipath baseline technology, has been successfully validated under mobil-



# 120 JAHRE SIGNAL+DRAHT

Vom **Stellwerk 1906** zu  
**SIGNAL+DRAHT 2026**





Feiern Sie mit! Buchen Sie Ihre Anzeige  
in der **Jubiläums-Ausgabe Nr. 11/26!**

Ihr Kontakt: Silke Härtel | silke.haertel@dvvmedia.com | Tel.: +49/40 237 14 -227

**Anzeigenschluss ist am 05.10.2026**

	UC1 ✓	UC2 ✓	UC3 ✓	UC4	UC5 ✓	UC6 ✓
	Application-Specific Path Selection	Fallback	Resilience via Path Selection	Resilience via Replication	Coverage Extension	Capacity Extension
✓ successful field test	FRMCS, PMNO	FRMCS, PMNO	FRMCS, PMNO	FRMCS, PMNO	FRMCS, PMNO	FRMCS, PMNO
<b>IOP Field Testing MP-QUIC (sm)</b> Funkwerk & Kontron	✓	✓	✓		✓	✓
<b>E2E Field Testing MP-QUIC (dm)</b> Kontron	✓	✓	✓		✓	✓
<b>E2E Lab Testing MP-QUIC (sm)</b> Funkwerk	✓	✓	✓	✓	✓	✓
<b>E2E Field Testing MP-TCP</b> Kontron	✓	✓	✓		✓	✓

**Bild 5: Überblick der getesteten Multipath-Protokolle und Anwendungsfälle**  
 Fig. 5: An overview of the tested multipath protocols and use cases

Quelle / Source: DB

tung als primäre Betriebsfunktionen verifizieren und auch Aggregation und Splitting validieren. Insgesamt wurden alle wichtigen FRMCS-Mehrwegefunktionen getestet. Die UC4-Funktion „Resilienz durch Replikation“, welche Duplizierung nutzt, wurde nur im Labor getestet. Alle anderen Anwendungsfälle (UC1, UC2, UC3, UC5, UC6) wurden erfolgreich im Feld erprobt (siehe Bild 5 für Details).

Das Projekt demonstrierte die Bandbreite von Multipath-Protokollimplementierungen und die Fortschritte bei der Interoperabilität. MP-TCP, als Multipath-Basistechnologie, wurde erfolgreich unter mobilen Bedingungen validiert, einschließlich der Unterstützung von TCP/TLS als Anwendungsprotokoll. Dank der Implementierung als Linux-Kernelmodul ist es performant. MP-QUIC, das aufgrund seiner Flexibilität und Anpassungsmöglichkeiten fortschrittlichere Multipath-Protokoll und der Fokus des Projekts, wurde ebenso erfolgreich validiert und unterstützt UDP und TCP/TLS als Anwendungsprotokolle. Dabei wurden Anwendungen wie iPerf, SSH/SCP und Video (gepufferter Download) ausgeführt. Es zeigte sich, dass MPF-Gateways mehrere Multipath-Protokolle parallel unterstützen können.

Basierend auf den einsatzfähigen MPF-Prototypen und unter den Bedingungen der Testumgebung wurden verschiedene Feld-KPI untersucht mit folgenden Ergebnissen: Die MPF-Umschaltzeit (vollständiger Datenpfadübergang) zwischen den FRMCS- und PMNO-Netzen betrug durchschnittlich 2,0 Sekunden, wobei je nach Testszenario und Abdeckungsbedingungen ein Intervall zwischen 1,5 und 4,7 Sekunden beobachtet wurde. Während der durch MP-QUIC ausgelösten Übergänge sank der Durchsatz vorübergehend um 45–60 % und erholte sich innerhalb von 1,2 bis 1,5 Sekunden. Die allgemeinen Pfadwiederherstellungszeiten lagen zwischen 0,8 und 3,9 Sekunden. Es gingen nur wenige Pakete im Zusammenhang mit einem Umschalt-/Wiederherstellungsereignis verloren oder wurden erneut übertragen. Die Latenzauswirkungen der MPF-Gateways waren im Vergleich zum Ende-zu-Ende-Vorteil hinsichtlich der Dienstkontinuität unbedeutend. Die MPF-Protokollübertragung übertraf vergleichbare Basisszenarien mit einem einzigen Pfad, bei denen Übergänge zu einem vollständigen Verbindungsverlust führten und eine erneute Session-Einrichtung erforderlich machten, was die Dienstkontinuität, Ausfallsicherheit und Verfügbarkeit deutlich verschlechterte.

ity, including the support of TCP/TLS as the application protocol. It proved to be performant because it has been implemented as a Linux kernel module. MP-QUIC, i.e. the more advanced multipath protocol due to flexibility and customisation potential and the focus of the project, has been successfully validated supporting UDP and TCP/TLS as application protocols and running several applications including iPerf, SSH/SCP and video (buffered download). It has been possible to show that MPF gateways can support multiple multipath protocols in parallel.

Based on the deployment-grade MPF prototypes and under the conditions of the testbed, several field-KPI have been examined with the following indicative outcomes: an average MPF switching time (full data path transition) between the FRMCS and PMNO networks of 2.0 seconds with an interval observed in the 1.5–4.7 seconds range depending on the test scenario and coverage conditions. During MP-QUIC triggered transitions, the throughput temporarily dropped by 45–60 %, then recovered within 1.2–1.5 seconds. General path recovery times have been observed within the range of 0.8–3.9 seconds. Typically only a few packets were dropped or got lost and retransmitted after a switching/recovery event. The latency impact of the MPF GWs was insignificant compared to the end-to-end benefit in service continuity. The MPF protocol transmission outperformed the comparable baseline single-path scenarios, where transitions caused complete connectivity loss and required session reestablishment resulting in materially worse service continuity, resilience and availability.

The radio conditions correlated strongly with the MPF switching behaviour, i.e. they were clear triggers for the transitions. For example, a signal strength (RSRP) of roughly -115 dBm consistently triggered a transition from private FRMCS to the public 5G network at the testbed.

Overall, the project has verified that multipath technology has reached an advanced level of maturity and is close to being ready for FRMCS deployments, thereby enhancing the resilience, session and connection continuity and availability of the FRMCS networks and as such improving overall operating efficiency. Cross-vendor interoperability with MP-QUIC has been achieved between the Funkwerk MPF client GW and the Kontron MPF server GW implementation. This was the first cross-vendor MP-QUIC setup demonstrated for FRMCS in the field. ■

Die Funkbedingungen korrelierten mit dem MPF-Umschaltverhalten, d. h. sie waren eindeutige Auslöser für die Übergänge. Beispielsweise führte eine Signalstärke (RSRP) von etwa -115 dBm im Testfeld stets zu einem Wechsel vom privaten FRMCS- zum öffentlichen 5G-Netz. Insgesamt bestätigte das Projektergebnis, dass die Multipath-Technologie einen hohen Reifegrad erreicht hat. Dadurch werden Ausfallsicherheit, Sitzungs- und Verbindungskontinuität sowie Verfügbarkeit von FRMCS-Netzen verbessert und somit die Gesamtbetriebseffizienz gesteigert. Die herstellerübergreifende Interoperabilität mit MP-QUIC wurde zwischen der Funkwerk MPF-Client-Gateway- und der Kontron MPF-Server-Gateway-Implementierung erreicht. Dies war die erste herstellerübergreifende MP-QUIC-Konfiguration, die für FRMCS im Feld demonstriert wurde. ■

#### 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] Commission Implementing Decision (EU) 2021/1730, Sept. 2021
- [3] ETSI TS 103 765-1 v1.1.1, Jan. 2026
- [4] Karabinos, T.; Holfeld, B.; Fritzsche, R. et al.: "5G-RACOM – Feldstudie zu hybriden FRMCS-Netzen für ein resilientes Bahnfunksystem," SIGNAL+DRAHT 9/2024
- [5] 5G-RACOM project website, <https://franco-german-5g-ecosystem.eu/5g-racom/>
- [6] IETF, QUIC Working Group
- [7] IETF, Multipath TCP Working Group

#### AUTOREN | AUTHORS

##### Tomas Karabinos

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

##### Bernd Holfeld

Lead FRMCS Technology Tests  
DB InfraGO AG  
Anschrift / Address: EUREF-Campus 17, D-10829 Berlin  
E-Mail: bernd.holfeld@deutschebahn.com

##### Arne Weber

FRMCS Architect  
DB InfraGO AG  
Anschrift / Address: EUREF-Campus 17, D-10829 Berlin  
E-Mail: arne.weber@deutschebahn.com

##### Mainul Hassan

Development Engineer  
Funkwerk Systems GmbH  
Anschrift / Address: Im Funkwerk 5, D-99625 Kölleda  
E-Mail: mainul.hassan@funkwerk.com

##### Kevin Wriston

Senior Architect Mission Critical Networks  
Kontron Transportation  
Anschrift / Address: Ziegelei 3, D-88090 Immenstaad  
E-Mail: kevin.wriston@kontron.com

##### Manfred Taferner

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

##### Zubair Shaik

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

##### André Apitzsch

Research Associate  
Technische Universität Chemnitz  
Anschrift / Address: Straße der Nationen 62, D-09110 Chemnitz  
E-Mail: andre.apitzsch@etit.tu-chemnitz.de

Ihre Innovationen für die **digitale Schiene** sind **jetzt** gefragt!  
Präsentieren Sie Ihr Unternehmen zielgerichtet in SIGNAL+DRAHT.  
Das international führende Fachmedium für die Leit-, Sicherungs-  
und Informationstechnologie.



DSTW  
DIGITALISIERUNG  
MOBILITÄT  
ZUKUNFTSTECHNOLOGIE  
AUTOMATISIERUNG  
ILBS  
ETCS  
KÜNSTLICHE INTELLIGENZ