

Sachbericht zum Verwendungsnachweis

Teil I – Kurzbericht

**WIR!-Projekt: Anforderungen an 5G-Mobilfunk für sicherheitsrelevante
Bahnanwendungen
(FKZ 03WIR1212)**

**Zuwendungs-
empfänger: Technische Universität Chemnitz**

Laufzeit: 07/2021 – 10/2024

1 Ursprüngliche Aufgabenstellung

Das Projekt „Anforderungen an 5G-Mobilfunk für sicherheitsrelevante Bahnanwendungen“ (5G4Rail) untersucht, wie der 5G-Mobilfunkstandard das veraltete GSM-R-System im Bahnbereich ersetzen und für zukünftige Anwendungen genutzt werden kann. Ziel ist es, die Anforderungen an eine sichere Ende-zu-Ende-Kommunikation (E2E) mit 5G zu analysieren und die technischen Unterschiede zu GSM-R zu bewerten.

Wichtige Projektziele:

Anforderungsanalyse: Untersuchung der E2E-Kommunikation mit Fokus auf Safety-Aspekte und Vergleich mit GSM-R.

Integration von Rail Safe Transport Application (RaSTA): Prüfung, wie das RaSTA-Netzwerkprotokoll in ein IP-basiertes Netzwerkmodell mit 5G eingebunden werden kann.

FRMCS-Standards: Analyse der Anforderungen des zukünftigen europäischen Bahnfunksystems Future Railway Mobile Communication System (FRMCS) und Ableitung von Grenz-Use-Cases.

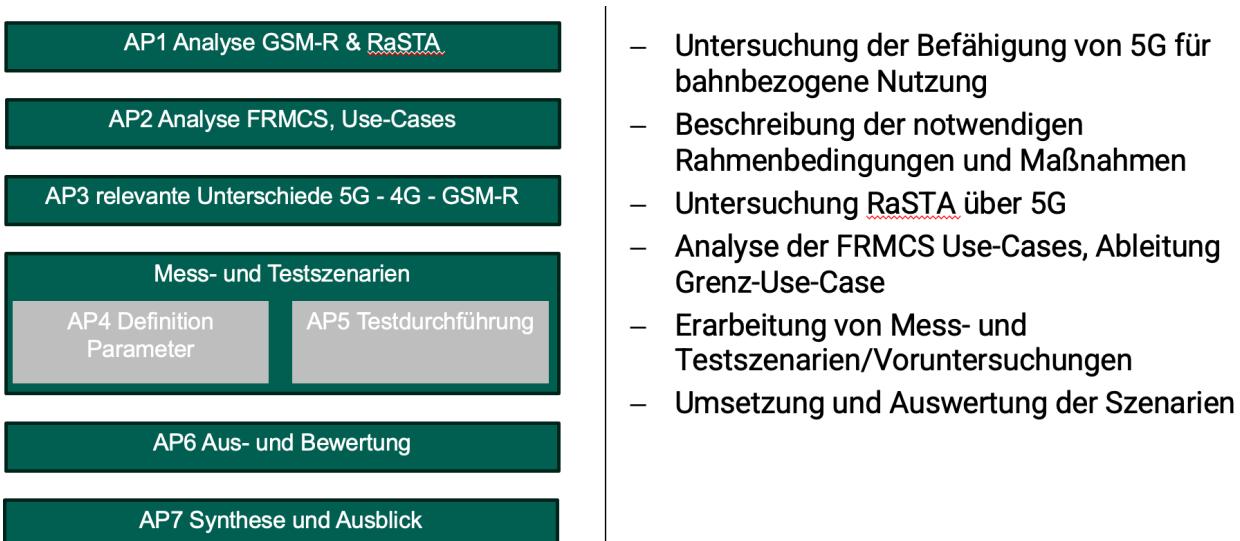
Infrastruktur-Optionen: Vergleich von 5G-Standalone-Lösungen und Shared-Network-Ansätzen (z. B. Slicing).

Mess- und Testszenarien: Entwicklung und Durchführung von Tests zur Bewertung der Quality-of-Service-Parameter, wie Latenz, Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit.

Das Projekt soll wissenschaftliche Grundlagen schaffen, praktische Tests durchführen und Vorschläge für die Zertifizierung von 5G im Bahnbereich entwickeln. Es trägt zur Digitalisierung und Automatisierung des Bahnbetriebs bei und unterstützt den Strukturwandel in der Region Chemnitz-Erzgebirge.

2 Ablauf des Vorhabens

Der Projektablauf hielt sich im Wesentlichen an den unten abgebildeten Arbeitspaketplan. Aufgrund von Problemen bei der Umsetzung des RaSTA-Protokolls, mussten im letzten Teil der Projektzeit die Mess- und Testszenarien etwas angepasst werden. Es wurden zwei voneinander getrennte Szenarien betrachtet.



Durch eine kostenneutrale Verlängerung um 4 Monate bis 31.10.2024 konnten alle wesentlichen im Arbeitsplan formulierten Aufgaben bearbeitet werden, trotz der anfänglichen Verzögerungen aufgrund von unerwarteten Herausforderungen bei der Stellenbesetzung sowie bei den inhaltlichen Herausforderungen hinsichtlich des RaSTA-Protokoll-Stacks.

Im letzten Teil des Projektes wurde die Neovendi GmbH als Partner für die Beratung von Testszenarien und RaSTA beauftragt.

3 Zusammenfassung der wesentlichen Ergebnisse

1. RaSTA-Protokoll

- RaSTA ist ein sicherheitskritisches Übertragungsprotokoll, das bisher nur für kabelgebundene Verbindungen genutzt wird. Eine Nutzung über 5G könnte den Betrieb bei Ausfällen der Kabelverbindungen sicherstellen.
- Testszenarien für RaSTA über 5G wurden entwickelt, konnten jedoch nicht durchgeführt werden, da die RaSTA-Implementierungen fehlerhaft und unvollständig waren. Dies führte zu nicht standardkonformem Verhalten bei Paketverlusten.
- Verbesserungen und Korrekturen an Open-Source-Implementierungen von RaSTA wurden vorgenommen und den Projektpartnern bereitgestellt.

2. FRMCS

- FRMCS ist entscheidend für die Standardisierung und Implementierung moderner Bahnanwendungen in Europa.
- Die Anforderungen an Latenz, Zuverlässigkeit und Geschwindigkeit wurden analysiert und in Klassen unterteilt. Die Ende-zu-Ende-Latenz und Zuverlässigkeit sind essenziell für sicherheitskritische Anwendungen.

3. Grenz-Use-Case Virtuelles Kuppeln (Virtual Coupling)

- Virtuelles Kuppeln ermöglicht eine dynamische und flexible Zugsteuerung, bei der Züge in einem definierten Abstand auf demselben Gleis fahren.
- Messungen mit PKW als Versuchsträger zeigten, dass die Anforderungen an Datenrate und Latenz erfüllt wurden.
- Langzeituntersuchungen und Tests mit größeren Reichweiten sind notwendig, um die Verbindungszuverlässigkeit und die praktische Umsetzung für Züge zu bewerten.

4. Messungen und Tests

- Messungen für Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation (V2V) über 5G wurden erfolgreich durchgeführt. Die Paketumlaufzeit lag durchschnittlich bei 30 ms und die Datenrate erreichte ca. 25 Mb pro Sekunde.
- Die Reichweite der Verbindung war aufgrund der geringen Sendeleistung begrenzt (max. 160 m).

5. Synthese und Ausblick

- Die Ergebnisse zeigen, dass 5G-basierte Direktkommunikation für sicherheitskritische Anwendungen im Bahnbereich vielversprechend ist.
- Weiterführende Untersuchungen sind notwendig, insbesondere für die Langzeitzuverlässigkeit und größere Reichweiten.
- Ein Anschlussprojekt wird empfohlen, um die Nutzung von RaSTA über Mobilfunk weiter zu erforschen und praktische Tests durchzuführen.

6. Verwertbarkeit der Ergebnisse

- Die gefundenen Fehler in den RaSTA-Implementierungen wurden behoben, was die Nutzung und Untersuchung des Protokolls erleichtert.
- Das Deutsche Zentrum für Schienenverkehrsforschung zeigte Interesse an einer vergleichenden Betrachtung der verschiedenen RaSTA-Implementierungen.

Die Ergebnisse des Projekts liefern eine solide Grundlage für weitere Forschung und praktische Anwendungen im Bereich 5G und Bahntechnologie.

Sachbericht zum Verwendungsnachweis

Teil II – Ausführlicher Bericht

**WIR!-Projekt: Anforderungen an 5G-Mobilfunk für sicherheitsrelevante
Bahnanwendungen
(FKZ 03WIR1212)**

Zuwendungsempfänger: Technische Universität Chemnitz

Laufzeit: 07/2021 – 10/2024

Durchgeführte Arbeiten

Im vorliegenden Dokument werden durchgeführte Arbeiten im Projekt aufgeführt. Die Arbeiten orientieren sich größtenteils an den in Abbildung 1 gezeigten Arbeitspaketplan.

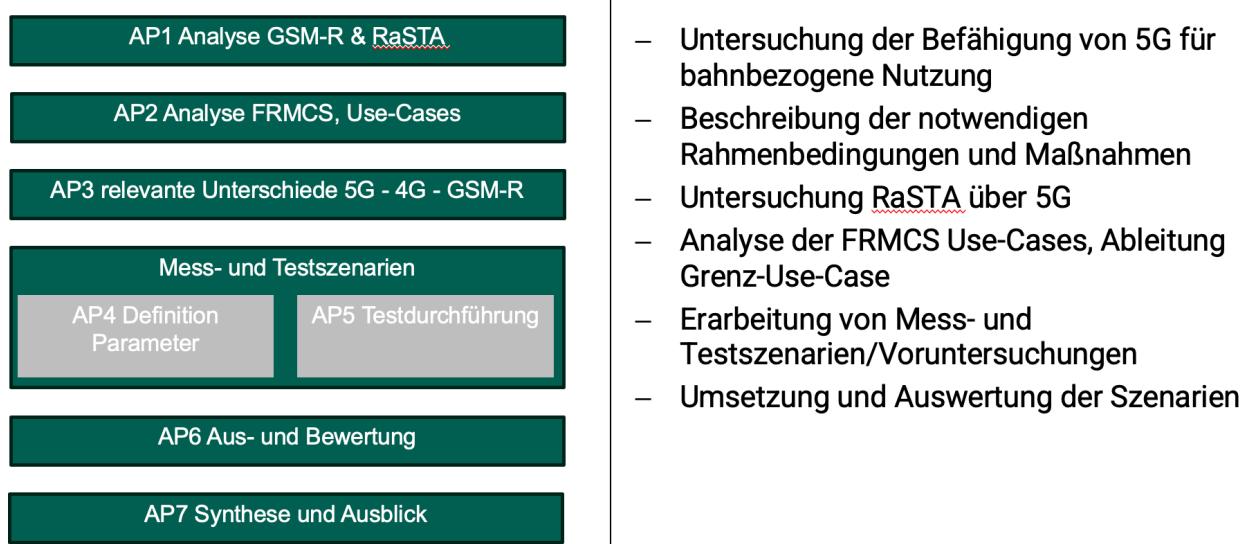


Abbildung 1 - Arbeitspakte nach Vorhabensbeschreibung und wichtigste Ziele

Analyse relevanter technischer Unterschiede und Eigenschaften von GSM-R (GPRS) im Vergleich zu GSM (GPRS) und Einordnung des RaSTA-Netzprotokolls in das OSI-Schichtenmodell

Rail Safe Transport Application (RaSTA) [1] ist ein Übertragungsprotokoll, das für die Steuerung von Eisenbahninfrastruktur, sprich sicherheitskritischer Systeme, entwickelt wurde. Es kommt bei der Kommunikation zwischen Stellwerk und Feldelementen, wie z.B. Weichen und Signalanlagen, zum Einsatz. Es wird genutzt, wenn kein (vollständiges) Vertrauen in das Übertragungssystem besteht und spezielle Anforderungen für eine sicherheitsrelevante Kommunikation (DIN EN 50159) erfüllt sein müssen.

Zum gegenwärtigen Zeitpunkt beschränkt sich der Einsatz des Protokolls auf kabelgebundene Verbindungen. Sollten diese Verbindungen über Kabel ausfallen, beispielsweise durch Bauarbeiten oder Sabotage, dann könnte eine weiterhin bestehende 5G-Verbindung zwischen Stellwerk und Steuergeräten den Betrieb der Infrastruktur sicherstellen.

Um zu entscheiden, ob das RaSTA-Protokoll für den Einsatz über eine 5G-Verbindung geeignet ist, ist es zunächst wichtig zu verstehen, wie das Protokoll aufgebaut ist und funktioniert.

RaSTA ist ein bidirektionales Protokoll, welches zwischen der Anwendungs- und der Transportschicht (TCP/IP-Referenzmodell) angesiedelt ist und aus den folgenden zwei Schichten bestehend (siehe Abbildung 2):

- Sicherheits- und Sendewiederholungsschicht
- Redundanzschicht

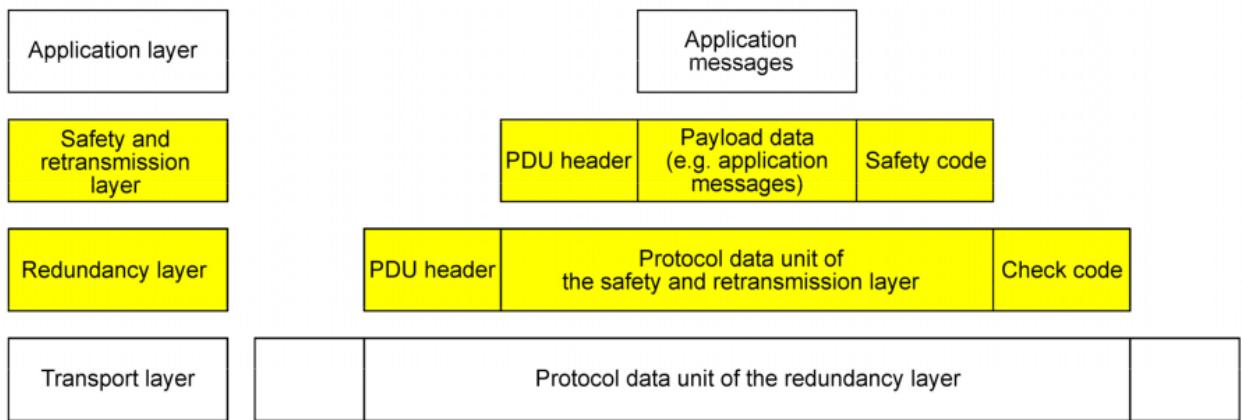


Abbildung 2 - RaSTA-Protokollstack

Durch die Sicherheits- und Sendewiederholungsschicht wird sichergestellt, dass verlorengegangene Pakete erneut gesendet werden und dass diese in der richtigen Reihenfolge bei der Anwendungsschicht ankommen - dafür werden die Pakete fortlaufend nummeriert.

Die Redundanzschicht sendet identische Pakete über mehrere Pfade und führt diese auf Empfängerseite wieder zusammen. Dadurch kann die Paketverlustrate und damit die Anzahl der Sendewiederholungen reduziert werden. Bei der Deutschen Bahn (DB) zum Beispiel werden für jede Verbindung jeweils zwei physisch getrennte Kanäle genutzt. Sollte einer davon ausfallen, dann könnte über den zweiten Kanal die Infrastruktur weiterhin gesteuert werden.

Weitere Features von RaSTA sind:

- Aufrechterhaltung der Verbindung durch regelmäßige Nachrichten (Heartbeats)
- Gesendete (Daten-, Heartbeat-)Pakete bestätigen das jeweils letzte empfangene Paket

Für die zugrundeliegende Transportschicht wird dabei entweder UDP oder TCP/TLS genutzt.[2]

Analyse FRMCS

Ein Großteil der Recherche für das AP2, also für FRMCS, ist in den Dokumenten der Union Internationale des Chemins de fer (UIC) zu finden. Die FRMCS-Dokumente haben einen hierarchischen Aufbau (Abbildung 3), der auf den Spezifikationen und Normen des FRMCS basiert. Die Dokumente umfassen Spezifikationen für die Funktionalität, das Protokoll, die Hardware und die Anwendung des Systems. Sie werden von der UIC und der Eisenbahnindustrie gemeinsam entwickelt und sind für die Standardisierung und Implementierung von FRMCS-Systemen in Europa entscheidend. Wesentliche Informationen zur Standardisierung leistete das Projekt 5GRail unter der UIC. Eine große Herausforderung ist die Aktualisierung der Technischen Spezifikation für die Interoperabilität der Zugsteuerung, Zugsicherung und Signalgebung (TSI CCS) durch die Europäische Eisenbahnagentur mit einer vollständigen Beschreibung von FRMCS im Hinblick auf die Funktionalitäten für die Interoperabilität.

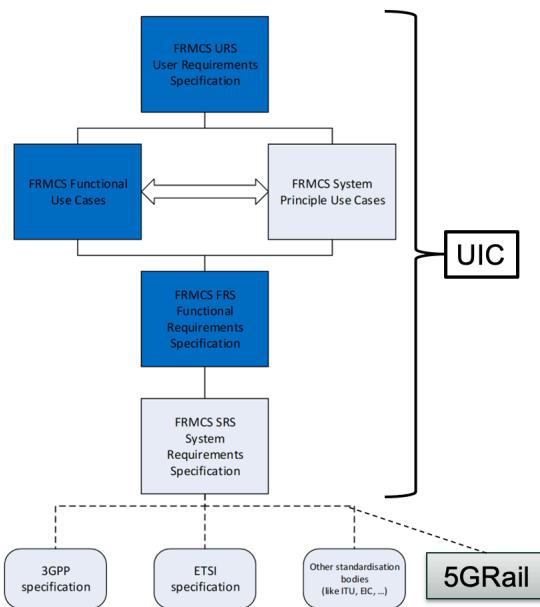


Abbildung 3 - Dokumentenaufbau nach UIC[8]

Analyse Use Cases

Use Cases für FRMCS beschreiben spezifische Anwendungen und Vorteile, die mit dem neuen Kommunikationssystem für den Eisenbahnbereich erreicht werden können. Sie zeigen, wie FRMCS die digitale Transformation der Eisenbahn ermöglicht und Effizienz, Sicherheit und Flexibilität erhöht. Dabei werden die Anwendungen typisiert in Kommunikationsanwendungen und unterstützende Anwendungen. Eine Unterscheidung nach der Verwendung der Anwendung in „Performance“ (Anwendungen, die dazu beitragen, die Leistung des Bahnbetriebs zu verbessern, z. B. Zugabfahrt, Telemetrie usw.), „Business“ (Anwendungen, die den Bahnbetrieb im Allgemeinen unterstützen, wie drahtloses Internet etc.) und „Critical“ (Anwendungen, die für den Zugverkehr und die Sicherheit unerlässlich oder gesetzlich vorgeschrieben sind, z. B. Notfallkommunikation, Rangieren, Anwesenheit, streckenseitige Instandhaltung, ATC).

Die Use Cases nach 3GPP [6] sind, wie in Abbildung 4 zu sehen, kategorisiert. Für die Ableitung eines Grenz-Use-Cases wird hier etwas näher auf den Quality-of-Service-Use-Case (QoS-Use-Case) eingegangen.

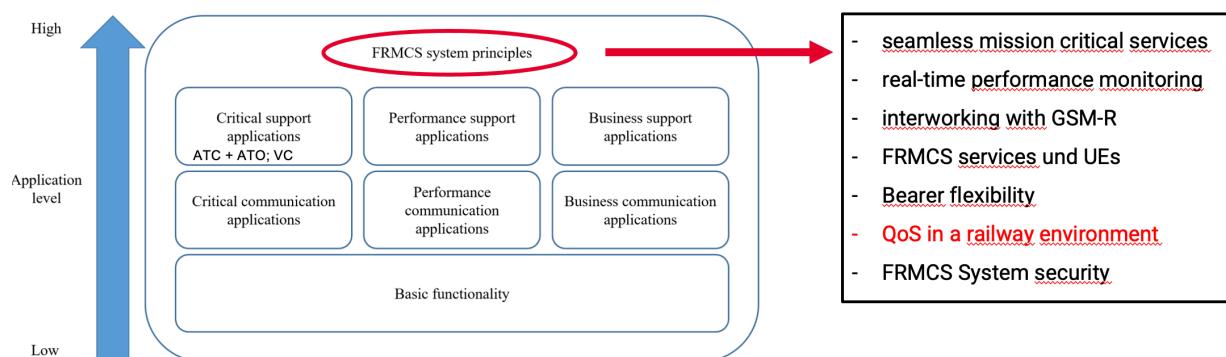


Abbildung 4 - USE Case Kategorien nach 3GPP

Im Use Case QoS in einer Eisenbahnumgebung nach [7] stellen sich im Wesentlichen zwei Dienstmerkmale in Bezug auf reale Werte heraus. Diese sind die Ende-zu-Ende-Latenzzeit und die Zuverlässigkeit und werden in Klassen unterteilt.

Latenzklassen:

„low“: Die Verzögerung von Benutzerdaten beeinträchtigt das Funktionieren der Anwendung
ultra low: ≤ 10 ms; low: ≤ 100 ms

„normal“: Die Verzögerung der Nutzdaten beeinträchtigt den Ablauf und den Fortschritt der Anwendung nicht; normal: ≤ 500 ms; best effort: > 500 ms

Die Ende-zu-Ende-Latenz in FRMCS bedeutet, dass Funktionen, Leistungsmerkmale und Qualitätsanforderungen immer für die gesamte Kommunikationsstrecke – vom Zug bis zum Backend und zurück – betrachtet und gewährleistet werden müssen. Dies ist essenziell für die Zuverlässigkeit und Sicherheit moderner Bahnanwendungen, die auf FRMCS und 5G-Technologie basieren. Im Unterschied dazu ist die E2E-Latenz im 5G von UE zu UPF definiert [9].

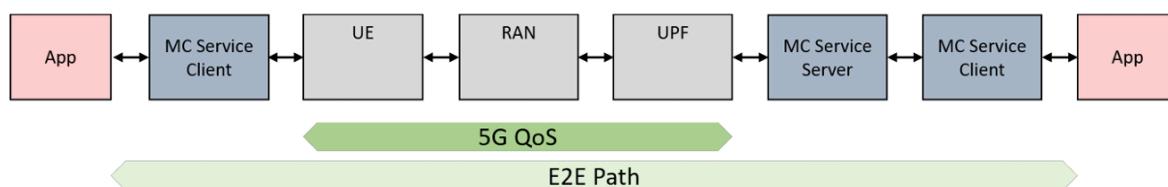


Abbildung 5 - Unterschied E2E-Latenz in FRMCS und 5G

Zuverlässigkeitsklassen:

„high“: Der Paketverlust auf der Transportebene ist außergewöhnlich selten
ultra-high: 99.9999%; high: 99.9%

„normal“: Der Paketverlust auf der Transportebene ist selten; normal: 99%

Ein weiteres Attribut ist die Geschwindigkeit, unterteilt in drei Bereiche.

„Low“: ≤ 40 km/h

„Normal“: $> 40 \text{ km/h}, < 250 \text{ km/h}$

„High“: ≥ 250 km/h, ≤ 500 km/h

Definition von Mess- bzw. Testszenarien und der benötigten Testumgebung für QoS-Parameter

Im Rahmen des Projekts wurden mehrere Testszenarien entwickelt, um das Verhalten des RaSTA-Protokolls über 5G unter verschiedenen Bedingungen zu evaluieren.

Im Projekt wurde sich dabei auf eine Bandbreite von 20 MHz im Frequenzband n78 (3,3 GHz – 3,8 GHz) beschränkt, da höhere Bandbreiten eine höhere Datenrate zur Verfügung stellen und damit weniger einschränkend wirken.

Für die Konfiguration des RaSTA-Protokolls wurden jeweils die in EULYNX[2] definierten Standardparameter verwendet. Als Datenquelle für den Datenaustausch zwischen den RaSTA-Instanzen soll eine vom Unterauftragnehmer Neovendi bereitgestellte SCI-P-Anwendungsschicht dienen.

Für die Aufzeichnung der versendeten Pakete kommt das Tool Wireshark zum Einsatz. Mit Hilfe dieses Tools erfolgt abschließend die Bestimmung von Latenz, Jitter und der Anzahl der verlorengegangenen Pakete.

Im Folgenden sind kurz die Testszenarien aufgeführt

Szenario 1

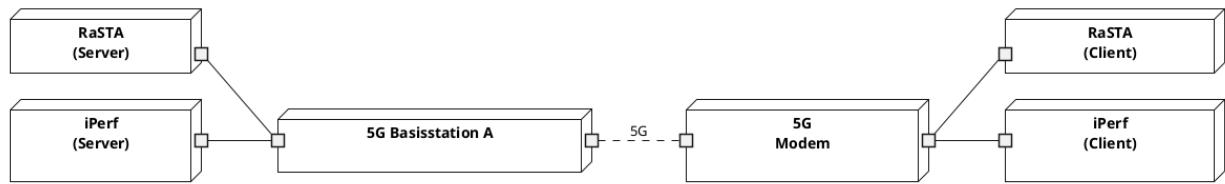


Abbildung 6 - Schematische Darstellung RaSTA Szenario 1

Einschränkung der zur Verfügung stehend Bandbreite durch Auslastung des Frequenzbandes durch einen zusätzlichen Datenstrom (zum Beispiel generiert mittels iperf).

Szenario 2

Reduktion der Signalstärke (lässt sich am Test-Server einstellen, Erhöhung des Abstands zwischen UE und RAN daher nicht nötig).

Szenario 3

Erzeugung von Interferenz durch zweites 5G-Netz im gleichen Frequenzband.

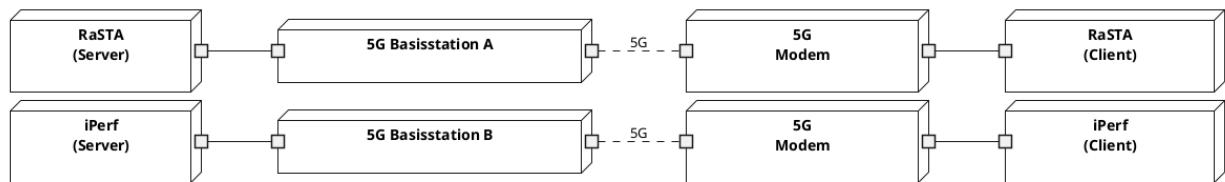


Abbildung 7 - Schematische Darstellung RaSTA Szenario 3

Alternativ wäre auch der Einsatz eines Störsenders denkbar. Auf Grund regulatorischer Beschränkungen wurde aber darauf verzichtet.

Szenario 4

Ein Übertragungsweg erfolgt über 5G, der andere über Ethernet.

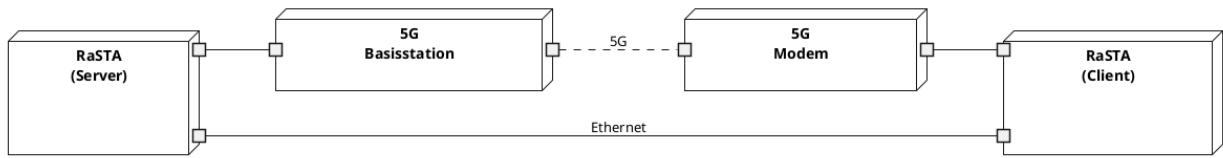


Abbildung 8 - Schematische Darstellung RaSTA Szenario 4

Durchgeführte Untersuchungen:

- Wie verhält sich das System im Normalfall (da die Latenz der beiden Übertragungswege unterschiedlich ist)?
- Wie verhält sich das System, wenn ein Übertragungsweg ausfällt?

Szenario 5

Kombination der zuvor genannten Szenarien mit einem zusätzlichen 5G-Network-Slice für RaSTA-Verbindungen bzw. Priorisierung von RaSTA-Verbindungen mittels QoS-Mechanismen.

Szenario 6 (optional)

Verwendung von TCP statt UDP als Transportlayer, um zu testen, wie sich die TCP-Re-Transmission und die RaSTA-Re-Transmission gegenseitig beeinflussen.

Grundlage dieser Untersuchung bildet eines der vorherigen Szenarien, bei dem es zu Paketverlusten kam (denn nur dann ist eine Re-Transmission von Bedeutung).

Mess- bzw. Testdurchführung

Bei der Vorbereitung zur Durchführung dieser Untersuchung stellte sich heraus, dass sowohl die relativ spät im Projektverlauf zur Verfügung gestellte DB-Implementierung des RaSTA-Protokolls als auch die anderen RaSTA-Implementierungen [3, 4, 5] fehlerhaft/unvollständig sind. Dieser Mangel ließ sich in der Kürze der verbleibenden Projektlaufzeit nicht beheben.

Das Problem wurde bei der Simulation von Übertragungsproblemen durch die kontrollierte Erzeugung von Paketverlusten festgestellt. Das erwartete Verhalten war die erneute Sendung der Pakete über den Redundanz-Kanal. Stattdessen erfolgte die Schließung des Kommunikationskanals. Hierbei handelt es sich um Verhalten, das insbesondere im Zusammenhang mit der Kommunikation ausschließlich über Mobilfunk auftritt. Bei einer RaSTA-Verbindung über zwei redundante kabelgebundene Kanäle, wie sie von der DB eingesetzt werden, müssten beide Kanäle das gleiche Paket verlieren, damit der Fehler auftritt. Dies ist sehr unwahrscheinlich.

Da dieses Problem zu einem nicht standardkonformen Verhalten des RaSTA-Protokolls bei Paketverlust führt, würde dies die Messungen entscheidend negativ beeinflussen, wodurch die gewonnenen Erkenntnisse unbrauchbar wären. Aus diesem Grund erfolgte keine Durchführung von Mess- bzw. Testszenarien für dieses Szenario.

Auswertung und Bewertung der Mess- bzw. Testergebnisse für unterschiedliche QoS-Parameter

Eine Auswertung und Bewertung der Mess- bzw. Testergebnisse konnte für den RaSTA-Teil aus oben beschriebenen Gründen nicht durchgeführt werden

Use Case Virtual coupling (Grenz-Use-Case)

Virtual Coupling, (VC, Virtuelles Kuppeln) bei Zügen ist ein innovatives Konzept im Schienenverkehr, wobei zwei oder mehr Züge in einem definierten, geregelten Abstand auf demselben Gleis, sich in dieselbe Richtung bewegen und dabei die gleichen Bremseigenschaften [10] haben. Durch die nicht-physische Kopplung wird von einer Steigerung der Effizienz und Flexibilität im zukünftigen Schienenverkehr ausgegangen. Weitere Ziele sind:

- Aufbau mehrerer Zugverbände zu einem dynamischen Zugverband (VCTS)
- Slip coaching (dynamisches Trennen und Zusammenführen an Zwischenstationen)
- Erweiterung von ETCS L3 (L2)
- Kostensparnis durch Einsatz von fahrzeugseitigen Ausrüstungen
- Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit zu anderen Verkehrsmitteln

Es gibt umfassende, theoretische Betrachtungen, welche diese Punkte und auch die Machbarkeit untersuchen. Auch praktische Erprobungen hat es in Europa bereits gegeben, sowohl auf einer Hochgeschwindigkeitsstrecke mit TETRA Funk [10] als auch im Labor mit 5G Ultra-High Band (DLR). Jedoch gibt es bisher keine Erkenntnisse darüber, wie sich virtuelles Kuppeln mittels 5G aus den FRMCS-Spezifikationen mit Frequenzen im Low- und Mid-Band-Bereich umsetzen lässt. Die Spezifikationen in FRMCS (URS und SRS) geben noch keine Details zur Umsetzung des Use Cases über 5G, vielmehr ist kein dediziertes Übertragungssystem genannt. Innerhalb eines Projektworkshops mit den Projektpartnern, wurde auf Basis der Analysen sich dazu entschieden, diesen Use Case weiter zu untersuchen und ein Versuchskonzept für die off-network-Kommunikation zu erarbeiten.

Anforderungen an den Use Case Virtual Coupling

Im FRMCS Use Case [8] Dokument werden folgende Anforderungen definiert:

- Das virtuelle Kopplungssystem muss über einen zuverlässigen Kommunikationsträger verfügen, um zu gewährleisten, dass die sicherheitsrelevanten Daten zwischen den Komponenten, die Teil des virtuellen Kopplungssystems sind, übertragen werden. Das FRMCS-System stellt den Kommunikationsträger für diesen Datenaustausch bereit.
- Die Benutzer sind die fahrzeugseitigen virtuellen Kupplungseinheiten: eine Einheit ist an der Vorderseite des Zuges montiert (und kann auch mit dem fahrzeugseitigen ATC-System des Zuges verbunden sein), und eine Einheit ist am Ende des Zuges montiert. Bei einigen Implementierungen kann der Benutzer auch das Infrastruktursystem sein.
- Je nach Implementierung der virtuellen Kopplung ist eine Datenkommunikation für das virtuelle Kopplungssystem nur zwischen den Einheiten der aufeinanderfolgenden Züge oder zwischen den Einheiten in den Zügen und einem Infrastruktursystem erforderlich. Die Datenkommunikation ist eine Kommunikation von Benutzer zu Benutzer oder von mehreren Benutzern.
- Je nach Implementierung erfordert das virtuelle Kopplungssystem entweder eine off-network-

oder on-network-Kommunikation.

- Die Datenkommunikation fordert die QoS-Klasse an, die der Anwendungskategorie „Very Critical Data (QoS)“ innerhalb des FRMCS-Systems entspricht.

In der technischen Spezifikation „Mobilfunksysteme für Eisenbahnen“ der ETSI [7] werden konkrete QoS-Anforderungen an das 5G-System gestellt. Für die off-network-Kommunikation, also für die direkte Kommunikation zwischen zwei Nutzern, gelten die KPIs aus der Abbildung 9. Die Zuverlässigkeit ist definiert als: „Anzahl der gesendeten Pakete, die erfolgreich an eine bestimmte Systemeinheit innerhalb der für den angestrebten Dienst erforderlichen Zeitspanne zugestellt wurden, geteilt durch die Gesamtzahl der gesendeten Pakete (Vermittlungsschicht)“. Dieser Parameter erfordert eine extrem hohe Zuverlässigkeit der Verbindung. Die geforderte Entfernung und die maximal geforderte Geschwindigkeit bei der Übertragung im Eisenbahnumfeld erschweren das Erreichen dieser Anforderung. Wobei abzuwarten bleibt, ob die beiden letztgenannten Werte in der finalen FRMCS-Version ebenso definiert sind.

Scenario	End-to-end latency	Reliability (Note 1)	Speed limit	User experience data rate	Payload size (Note 2)	Area traffic density	Service area dimension (Note 3)	Max required communication range (meters) (Note 4)
Very Critical Data Communication	≤100 ms	99,9999%	≤500 km/h	100 kbps up to 1 Mbps	Small to Medium	Up to 10 Mbps/km	3 km along rail tracks	[1000 ~ 3000]
	≤300 ms	99,9%	≤40 km/h	100 kbps up to 1 Mbps	Small to Medium	Up to 100 Mbps/km	3 km along rail tracks	[1000 ~ 3000]

NOTE 1: Reliability as defined in sub-clause 3.1.

NOTE 2: Small: payload ≤ 256 octets, Medium: payload ≤ 512 octets; Large: payload 513 -1500 octets.

NOTE 3: Estimates of maximum dimensions.

NOTE 4: Relevant for Off-Network MCData Service only, supporting train platooning. All trains in a platoon are driving in the same direction.

Abbildung 9 - Performance Anforderungen für off-network nach ETSI

Messung V2V für virtuelles Kuppeln

Bei den Messungen für das virtuelle Kuppeln in der off-network-Verbindung wurde eine 5G-Funkverbindung zwischen Sender und Empfänger, die jeweils in einem separaten Fahrzeug platziert wurden, untersucht. Ein Fahrzeug wurde mit einer 5G-Basisstation ausgestattet, sodass die Kommunikation auf direktem Wege stattfinden konnte. Dabei bestand keinerlei Kopplung, im Sinne einer abhängigen Steuerung, der Fahrzeuge zueinander. Die Sprachkommunikation wurde über einen zusätzlichen Funkkanal realisiert, um Fahrbefehle auszutauschen. Die Fahrdaten entstanden im jeweiligen Fahrzeug.

Die Messungen wurden in zwei Kampagnen mit den Versuchsfahrzeugen der Professur für Nachrichtentechnik durchgeführt. Durch die Untersuchung mit PKW als Versuchsträger ist eine flexible Planung der Tests möglich gewesen. Zudem konnte so schneller auf im Versuch gewonnene Erkenntnisse reagiert werden. Auf dem Campus der TU Chemnitz in der Reichenhainer Str. wurde eine Strecke mit zu bis 750 m Gesamtlänge bei einer Geschwindigkeit bis max. 30 km/h befahren. Auf der Bundesstraße 101, entlang der Eisenbahnstrecke von Schlettau nach Scheibenberg, war eine Geschwindigkeit beider Fahrzeuge bis 100 km/h möglich. An beiden Messstrecken gilt die Frequenzzuteilung der Bundesnetzagentur für Campusnetze mit einer maximalen Strahlungsleistung (EIRP) von 640W bzw. 58 dBm.



Abbildung 10 - Streckenauswahl für die V2V-Szenarien

Messaufbau Hardware

Die Basisstation wurde im Folgefahrzeug mit Hilfe eines USRP von Ettus Research errichtet. Diese emuliert mit entsprechender Software eine eigene Funkzelle nach 3GPP 5G-Spezifikationen. Beide Fahrzeuge erhielten einem GNSS-Receiver mit externer Dachantenne, wobei ein Fahrzeug eine SAPOS unterstützte Lokalisierung als Positionsreferenz genutzt hat. Mit dieser Methode ist es möglich, den Fahrabstand mit einer Abweichung von unter 10 m für die meiste Zeit der Messungen zu bestimmen. Die GNSS-Daten dienten auch zur Synchronisierung der Zeitstempel bei der Fahrzeuge. Um Unterschiede in der Übertragungsqualität durch verschiedene Antennen zu untersuchen, wurden sowohl MIMO- als auch SISO-Antennen auf beiden Fahrzeugen installiert. Im Führungsfahrzeug wurden mit einem mobilen Netzwerkscanner von Rhode & Schwarz die Netzparameter im angewendeten Spektrum gemessen und lokal gespeichert. Leider war es nicht möglich, innerhalb des Projektes einen für die Hardware passenden RF-Zirkulator zu beschaffen. Ein solcher Zirkulator verhindert etwaige Schäden an Sendeverstärkern durch Reflexion. Dadurch konnte auch kein Sende- und Empfangsverstärker genutzt werden. Die Sendeleistung wurde dementsprechend reduziert angewendet, was eine geringere Reichweite der Datenübertragung erlaubt, aber dennoch ausreichend für die durchgeführten Szenarien war.



Abbildung 11 - Kommunikationshardware und Fahrzeuge für V2V-Messung

Setup und Szenarien

Auf der Strecke am Technologie Campus wurden Szenarien bis maximal 30 km/h durchgeführt. Die Fahrzeuge wurden dabei mit Hilfe der GNSS-Positionierung auf Abstand gebracht. Während der Fahrt mussten die Fahrzeugführer den Abstand konstant halten bzw. korrigieren. Zu Beginn wurde der maximal mögliche Messabstand durch Verbindungsabbruch ermittelt. Dieser lag in diesem Terrain bei ca. 80 m, was auf die widrigen Übertragungsverhältnisse (Interferenzen/Reflektionen) und die geringe Übertragungsleistung zurückzuführen ist. Wesentlich größere Messabstände sind mit diesem Messaufbau nur sehr schwierig mit entsprechender Sicherheit für Mensch und Technik zu realisieren und sollten wahrscheinlich nicht im öffentlichen Straßenverkehr durchgeführt werden. In einem statischen Szenario wurde das Fahrzeug mit der Basisstation geparkt, während das zweite Fahrzeug mit variierender Geschwindigkeit bis zum Maximalabstand überholt. Weitere Szenarien waren die Verfolgung mit konstanter Geschwindigkeit (5/15/30 km/h) bei verschiedenen Abständen (30/60 m) sowie dynamische Überholvorgänge, d. h. zwei sich in die gleiche Richtung bewegende Fahrzeuge und ein crossing-Szenario, in welchem sich die Fahrzeuge erst aufeinander zu und dann voneinander weg bewegten.

Entlang der Eisenbahnstrecke im Erzgebirge konnten Geschwindigkeiten bis max. 100 km/h realisiert werden. Es wurden ähnliche Szenarien, wie oben beschrieben, durchgeführt. Zusätzlich gewährleistete die Streckenführung Beschleunigungsszenarien, welche eine Änderung der Entfernung beider Fahrzeuge in kurzer Zeit ermöglichte. Die maximal gefahrene Entfernung lag bei 160 m.

In Abbildung 12 sind alle zellenspezifischen Übertragungsparameter für beide Messkampagnen aufgeführt. Das Messintervall lag bei 1 Hz, jedes Einzelszenario wurde dreimal wiederholt, wobei die Datenrate und die Paketumlaufzeit separat aufgenommen wurden. Alle Messungen wurden mit „line of sight“ durchgeführt, bedeuten also eine direkte Sichtverbindung beider Antennen je Fahrzeug.

Parameter	MCG-PCell
Band	N78 TDD
Center Frequency	37500 MHz
SSB NR-ARFCN	649920
Max. DL PDSCH MCS	10
PDSCH RB	103
SCS	30 kHz
Bandwidth	40 MHz
CSI RS	True
Tx EIRP Power (TUC)	-30 dBm
Tx EIRP Power (Erzg.)	0 dBm

Abbildung 12 -5G-Übertragungsparameter für V2V-Messung

Auswertung

Die Auswertungen wurden mit Hilfe von Matlab erzeugt und die insgesamt über 3000 Datenpunkte aller Einzelszenarien größtenteils zusammengefasst. Dies ermöglicht eine kompaktere Auswertung der untersuchten KPIs. Die Durchschnittswerte (rote Linie) sind aus jeweils 40 Datenpunkten gebildet. Die Messungen mit der MIMO-Antenne wurden nur auf der Strecke im Erzgebirge durchgeführt. Neben der Paketumlaufzeit (RTT) und der Datenrate im Downlink wurden die 5G spezifische Signalstärke und die Signalqualität erfasst und ins Verhältnis zur Geschwindigkeit bzw. des Abstandes der Fahrzeuge gesetzt. Auf die Auswertung der Zuverlässigkeit der Verbindung wurde bewusst verzichtet. Der experimentelle Aufbau, die geringe Übertragungsleistung und die geringe Messdauer der Einzelszenarien lassen hier keine sinnvollen Aussagen zu. In den folgenden Bildern sind die KPIs aus den Messpunkten gezeigt, es wird auf die Abhängigkeit der Geschwindigkeit nicht näher eingegangen, da sich eventuelle Effekte kaum sichtbar machen ließen. Es ist allerdings anzunehmen, dass diese sich bei höheren Geschwindigkeiten einstellen. In diesen Versuchen entstanden nur wenige Datenpunkte bei Geschwindigkeiten über 90 km/h. Eine höhere Datendichte bei größerer Geschwindigkeit lässt sicher gut auf Autobahnen mit PKWs realisieren, wenn eine entsprechende Mobilfunklizenz vorhanden ist.

Auswertung der SISO-Messungen

In Abbildung 13 ist die von der Basisstation empfangene Signalstärke RSSI zu sehen, welche inklusive aller Störeinflüsse angegeben wird. Abbildung 14 zeigt die Empfangsstärke des Referenzsignals ohne Interferenz und liegt bis 40 m Entfernung in einem Bereich bis $\varnothing -105$ dBm. Es ist davon auszugehen, dass es zu Paketverlusten in Abhängigkeit der Empfängerempfindlichkeit kommen kann. Diese eher schlechten Werte lassen sich sehr wahrscheinlich auf die fehlende Sendeleistung zurückführen. Beim SINR in Abbildung 15 sind über den gesamten Messverlauf gute bis befriedigende Werte, meistens über 10 dB zu erkennen. Eine Ursache dafür mag die gewählte Frequenz der Campuslizenz sein und Interferenzen, vor allem auf der Strecke im Erzgebirge, die an dem gewählten Messtag weniger vorhanden waren.

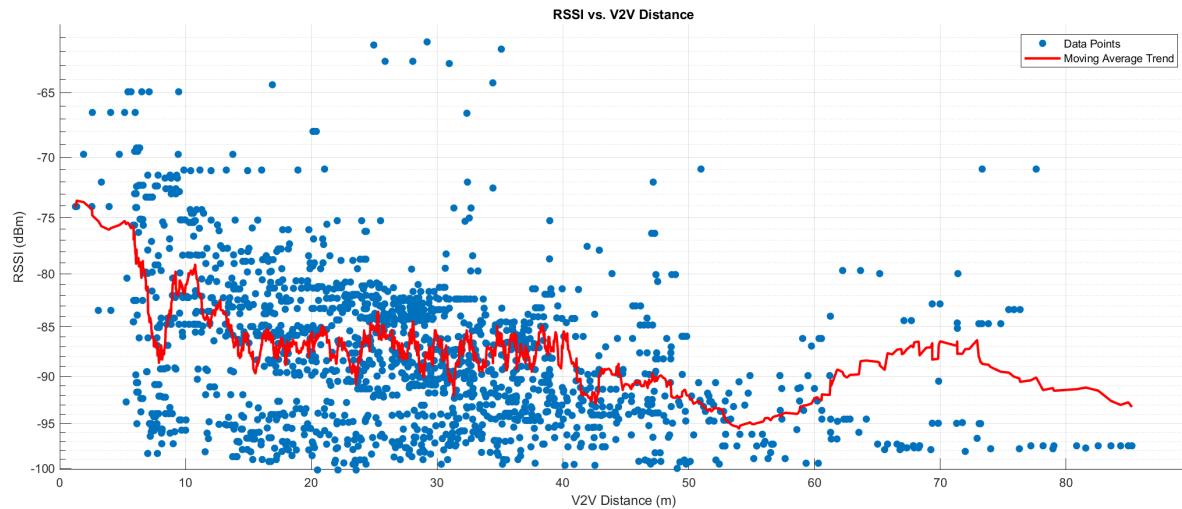


Abbildung 13 - Signalstärke in Abhängigkeit zur Entfernung, SISO

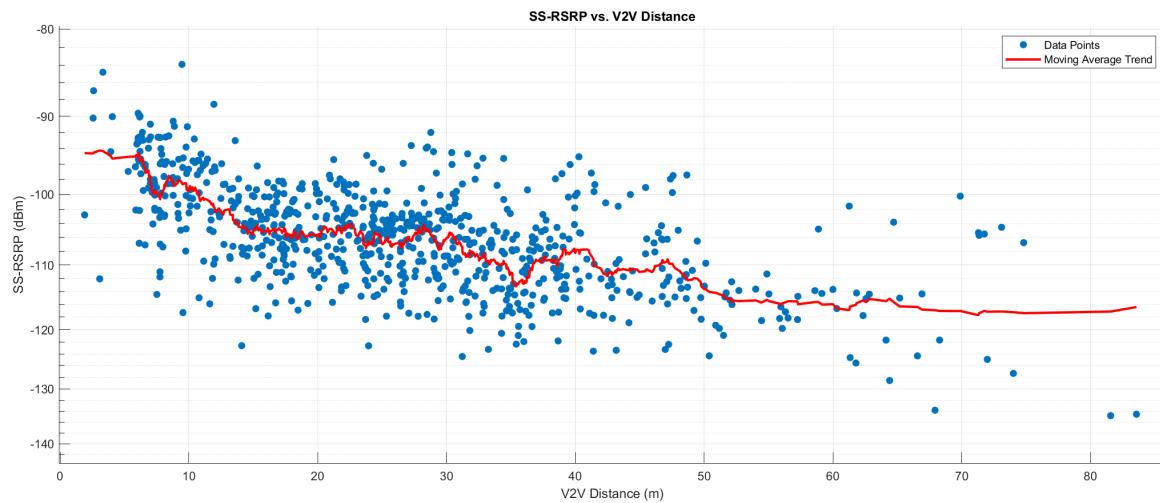


Abbildung 14 - Reference Signal Received Power in Abhängigkeit zur Entfernung, SISO

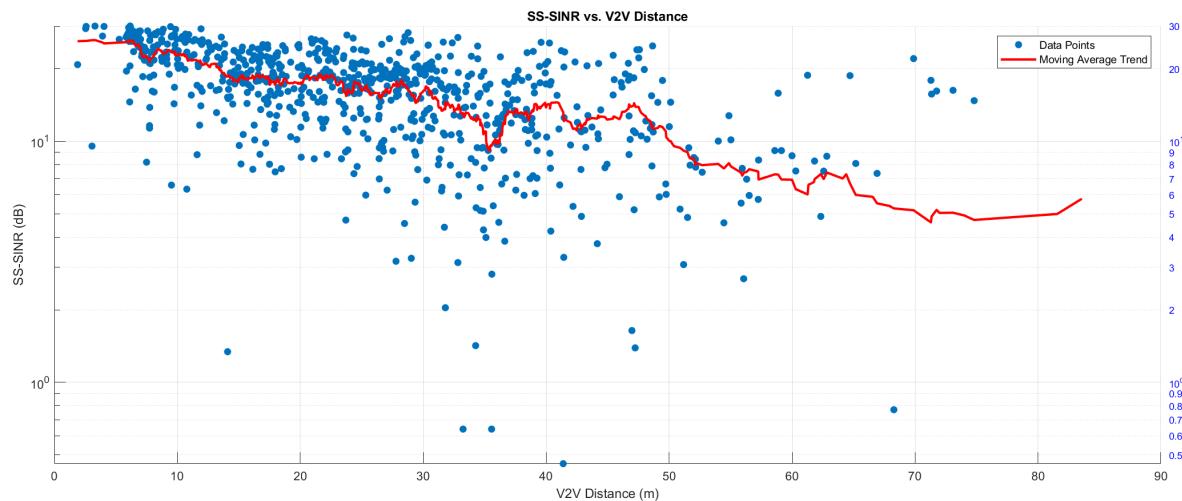


Abbildung 15 - Signal-Interferenz-Rauschverhältnis in Abhängigkeit zur Entfernung, SISO

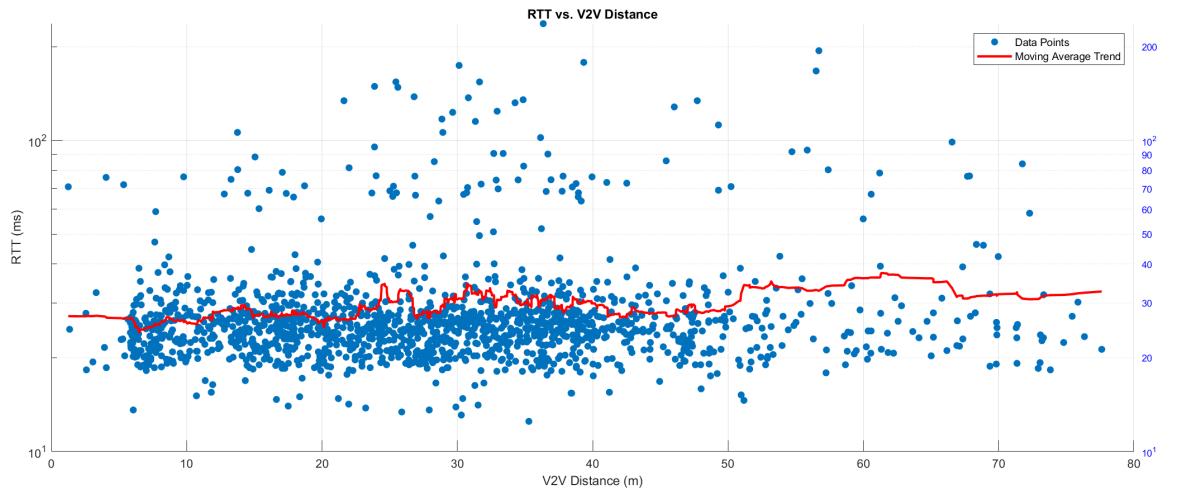


Abbildung 16 - Paketumlaufzeit in Abhängigkeit zur Distanz, SISO

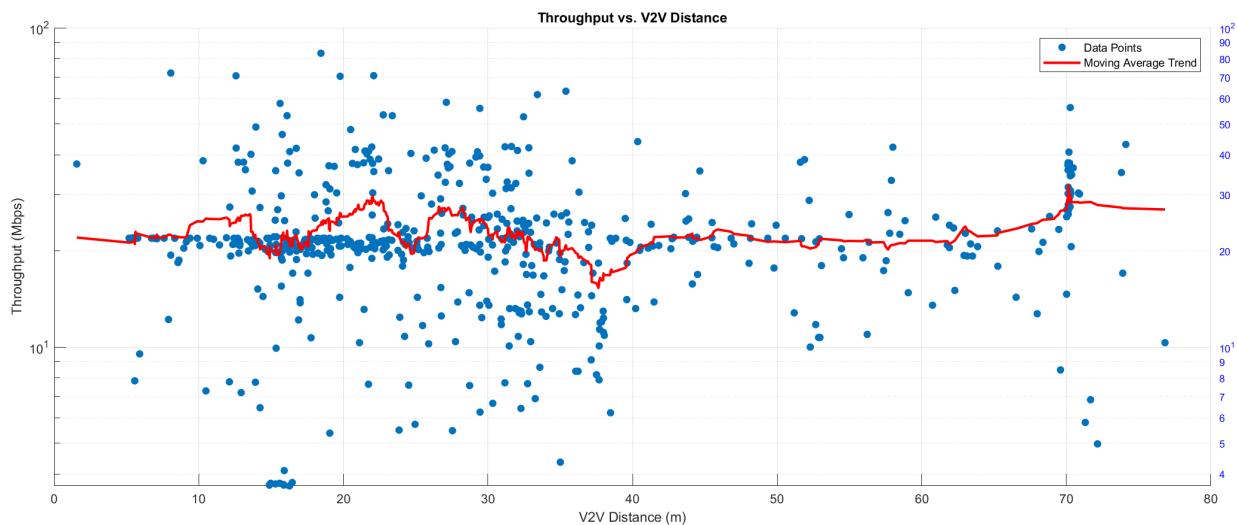


Abbildung 17 - Datenrate in Abhängigkeit zur Distanz, SISO

Die Paketumlaufzeit beschreibt die Zeit, die ein Ping von der Basisstation zum UE und wieder zurück benoigt. In Abbildung 16 lässt sich eine durchschnittliche RTT von 30 ms über den gesamten Messverlauf ablesen. Die Datenpunkte mit einer wesentlich größeren Zeitdauer sind wahrscheinlich auf Effekte wie hohe, unterschiedliche Beschleunigung der Fahrzeuge zurückzuführen. Dies lässt sich aber für diese Messung nicht genau bestätigen. Ebenso kann auch ein Netzwerkproblem (niedrige RSRP) zum Messzeitpunkt die Ursache sein. Gleichermaßen lässt sich für die Datenrate in Abbildung 17 sagen. Hier wurde im Mittel ein Wert von ca. 25 Mbps erreicht.

Auswertung der MIMO-Messungen

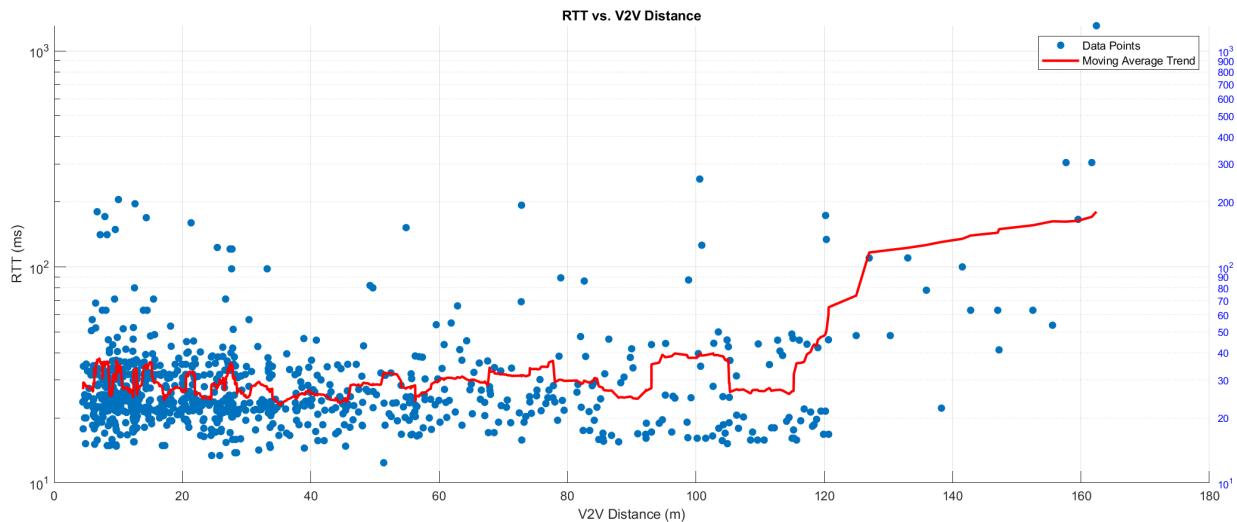


Abbildung 18 - Paketumlaufzeit in Abhängigkeit zur Distanz, MIMO

Bei den MIMO-Messungen wird anschließend nur auf die Paketumlaufzeit eingegangen. Alle Übertragungsparameter zeigen ein ähnliches Verhalten, wie oben bei den SISO-Messungen beschrieben. In Abbildung 18 ist eine durchschnittliche Paketumlaufzeit von 30 ms zu sehen. Es gab hier nur wenig Werte, die als „Ausreißer“ betrachtet werden können. Unter der Anmerkung, dass ab 120 m Entfernung nur sehr wenige Messpunkte aufgenommen wurden, steigt die RTT rasch auf über 100 ms.

Synthese und Outlook

Bei den geschilderten V2V-Messungen konnte erfolgreich eine direkte 5G-Funkverbindung von Fahrzeug zu Fahrzeug (PKW) aufgebaut werden. Durch das Emulieren einer mitgeführten Basisstation war die Nutzung weiterer Infrastruktur nicht notwendig. Dieser Ansatz kann sich auch auf elektrifizierte Züge für die Train-to-Train-Verbindung übertragen lassen. Die Anforderungen für den Use Case „Virtual Coupling“ in FRMCS in Hinblick auf Datenrate und Latenz sind bei allen Versuchen erreicht worden. Die Verbindungszuverlässigkeit konnte leider nicht untersucht werden. Die Entfernung zwischen den Fahrzeugen war aufgrund des für die Übertragung zu Verfügung stehenden Frequenzbereichs und der vielfach kleineren Sendeleistung, geringer als gefordert. Um weitere Aussagen zur Umsetzung des VC von Zügen über 5G treffen zu können, sind weitreichende Untersuchungen notwendig. Mit einer privaten Lizenz in den unteren 5G-Bändern (FRMCS; 5G low-band) lässt sich eine wesentlich größere Reichweite erzielen. In Langzeituntersuchungen ließe sich auch eine Aussage über die Ausfallrate machen.

Aufgrund der unvollständigen und fehlerhaften RaSTA-Software konnten keine weiteren Tests durchgeführt werden. Sobald der Mangel in der RaSTA-Software beseitigt ist, können die Messungen und Tests weiter durchgeführt und ausgewertet werden.

Im Abschluss-Workshop des Projektes wurde festgestellt, dass weitergehende Untersuchungen zum RaSTA-Verhalten im Zusammenhang mit Mobilnetzen sinnvoll wären, da ein zeitweiliger

oder permanenter Ersatz von Festnetz-Lösungen durch Mobilfunk-basierte Lösungen viele Vorteile hätte (u. a. mehr Flexibilität). Dies müsste allerdings in einem Anschlussprojekt erfolgen.

Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Das Projekt wurde an der TU Chemnitz durch die Professur für Nachrichtentechnik sowie die Professur für Kommunikationsnetze durchgeführt. Die im Rahmen des Projektes entstandenen Ausgaben betragen insgesamt 514.300,32 € (zzgl. Projektpauschale i. H. v. 102.860,06 €). Sie liegen damit 23.271,40 € (ohne Projektpauschale) unter der bewilligten Zuwendung. Die Ausgaben wurden im Wesentlichen für Personalausgaben zur Beschäftigung wissenschaftlicher Mitarbeiter (447.650,18 €), zur Beschäftigung von Hilfskräften (6.865,62 €) sowie für die Ausgaben für die Vergabe von Aufträgen (57.437,00 €) verwendet. Weiterhin erfolgten Ausgaben für sonstige allgemeine Verwaltungsausgaben (936,28 €) sowie für Dienstreisen (1.411,24 €).

Es wurde eine Umwidmung von Mitteln i. H. v. 15.000,00 € aus der Position 0834, 29.041,95 € aus der Position 0835, 2.003,46 € aus der Position 0843 und 1.916,76 € aus der Position 0844 in die Positionen 0812 (plus 46.508,60 €) und 0822 (plus 1.453,57 €) vorgenommen.

Die freiwerdenden Mittel haben sich wie folgt ergeben. Im Antrag war ein Auftrag zur Entwicklung einer komplexen Evaluationsplattform vorgesehen, allerdings konnte solch eine Plattform durch die Neovendi GmbH in das Projekt gebracht und eingesetzt werden.

Durch verschiedene Messfahrten konnte die tatsächliche Netzardeckung, die die aufgebaute Forschungsinfrastruktur entlang der Teststrecke Annaberg-Buchholz – Schwarzenberg liefert, untersucht werden. Da diese einen um einiges größeren Korridor entlang der Bahnlinie abdeckt als ursprünglich erwartet und geplant, konnten die im Projekt noch notwendigen Messfahrten kostengünstiger mit den an der Professur Nachrichtentechnik vorhandenen Fahrzeugen auf der entlang den Schienen führenden Bundesstraße 101 durchgeführt werden.

Für die im Projekt vorgesehenen Untersuchungen war dies ein technisch gleichwertiger und gültiger Ersatz, da Kommunikationsdienstklassen im Allgemeinen (mit höheren Anforderungen an Datenrate, Jitter und Latenz etc.) und keine speziellen Bahn-Anwendungen als Datenquelle/-senke in den Messungen verwendet wurden. Mittel für die Anmietung eines Forschungszuges waren daher im Projekt nicht mehr erforderlich. Weitere Hardwarekosten waren ebenfalls nicht erforderlich. Durch die Maßnahmen zur Eindämmung der Corona-Pandemie von Bund und Ländern ab März 2020 erfolgten Projektbesprechungen sowie Abstimmungen mit Verbundpartnern in Form von Online-Abstimmungen. Dies reduzierte zudem den Bedarf an Mitteln für die Durchführung von Dienstreisen. Dennoch wurde eine Konferenz, konkret die UIC global FRMCS Conference der International Union of Railways (UIC), besucht und die Möglichkeit zum Austausch vor Ort wahrgenommen.

Es erfolgte eine kostenneutrale Verlängerung der Projektlaufzeit um vier Monate. Diese wurde notwendig aufgrund verschiedener Verzögerungen. Hierzu zählen Verzögerungen in der Projektarbeit durch die Restriktionen aufgrund der Maßnahmen zur Eindämmung der Corona-Pandemie sowie aufgrund der Herausforderung, dass Auftragnehmer nicht wie vorgesehen einbezogen werden konnten. Des Weiteren dauerten die Arbeiten in den Grundlagen-Arbeitspaketen länger als ursprünglich geplant. Darüber hinaus verzögerte sich die in einem separaten Projekt verfolgte

Fertigstellung der 5G-Netzinfrastruktur, die eine Basis für das hier vorliegende F&E-Projekt darstellte, um mehrere Monate. Daher konnten mit den Mess- und Testkampagnen und deren Auswertung sowie mit dem Arbeitspaket „Synthese und Outlook“ erst verspätet begonnen werden. Die kostenneutrale Verlängerung der Projektlaufzeit ermöglichte das Aufholen dieser Verzögerungen sowie das Bearbeiten der geplanten Arbeiten.

Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Die durchgeführten Forschungsarbeiten im Projekt „5G4Rail“ und die dafür aufgewendeten Ressourcen waren notwendig und angemessen, da sie im Wesentlichen der Planung laut Projektantrag entsprachen und alle im Arbeitsplan formulierten Aufgaben erfolgreich bearbeitet wurden. Es waren trotz Verlängerung der Projektlaufzeit keine zusätzlichen Ressourcen für das Projekt notwendig.

Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Die in den genutzten Open-Source-Implementierungen von RaSTA [3, 4] gefundenen Fehler wurden, wenn möglich, behoben und die zugehörigen Korrekturen wurden den Projektpartnern zur Verfügung gestellt. Zu den identifizierten Fehlern gehörten zum Beispiel Speicherprobleme und nicht standardkonformes Verhalten beim Handshake.

Außerdem wurden auch Verbesserungen bezüglich der Handhabbarkeit des RaSTA-Protokolls vorgenommen. Dies ermöglicht Dritten einen leichteren Einstieg in die Verwendung und Untersuchung von RaSTA. Das Deutsche Zentrum für Schienenverkehrsforschung hat im Rahmen des Abschlussworkshops sein Interesse an einer vergleichenden Betrachtung der verschiedenen RaSTA-Implementierungen bekundet.

Verwertungsaktivitäten und Veröffentlichungen

Wissenschaftliche Ergebnisverwertung

Das Projekt stellt mehrere Herausforderungen, die wissenschaftlich weiter verwertet werden. Die bei den Messungen gewonnenen Erkenntnisse liefern die Basis für weitere Untersuchungen der Direktfunkverbindung mit 5G. Insbesondere wird angestrebt, die Effekte (Beschleunigung, Geschwindigkeit) zu untersuchen, welche Einfluss auf die Verbindungsparameter nehmen. Des Weiteren sind die Erkenntnisse essentiell, um einen Versuchsaufbau auf der Teststrecke im Erzgebirge mit der Funk-Infrastruktur der TU Chemnitz und zwei virtuell gekuppelten Zügen durchzuführen.

Veröffentlichungen:

Eine Veröffentlichung der V2V-Messungen ist im Q3 2025 von der Professur für Nachrichtentechnik geplant.

Referenzen

- [1] Prestandard DIN VDE V 0831-200, Juni 2015.
- [2] EULYNX Interface definition SCI Eu.Doc.92
- [3] <https://github.com/Railway-CCS/rasta-protocol>
- [4] <https://github.com/eulynx-live/librasta>
- [5] <https://github.com/SchweizerischeBundesbahnen/sbb-rasta-stack/>
- [6] 3GPP. (2021, Februar 4). 3GPP - TR 22.889 V17.4.0; Technical Specification Group Services and System Aspects; Study on Future Railway Mobile Communication System.
- [7] ETSI. (2022 – 05). ETSI – TS 22.289 V17.0.0 Release 17; LTE;5G; Mobile communication system for railways
- [8] UIC - International Union of Railways. (2020, Februar 21). Future Railway Mobile Communication System—Use cases.
- [9] UIC - International Union of Railways. (2020, Februar 21). Future Railway Mobile Communication System—System Requirements Specification.
- [10] Shift2Rail. Deliverable D6.1 - Advanced Signalling, Automation and Communication System (IP2) – Virtual Train Coupling System

Abkürzungsverzeichnis

ATC	Automatic Train Control
CS IRS	Channel State Information Reference Signal
E2E	End To End
EIRP	Effective Isotropic Radiated Power
FRMCS	Future Railway Mobile Communication System
GNSS	Global Navigation Satellite Systems
KPI	Key Performance Indicator
MCS	Modulation Coding Scheme
MGC	Master Cell Group
MIMO	Multiple Input Multiple Output
NR-ARFCN	New Radio – Absolute Radio Frequency Channel Number
PCell	Primary Cell
PDSCH RB	Physical Downlink Shared Channel
QoS	Quality of Service
RaSTA	Rail Safe Transport Application
RSRP	Reference Signal Received Power
RSSI	Received Signal Strength Indicator
RTT	Round Trip Time
SAPOS	Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Landesvermessung
SCS	Sub Carrier Spacing
SINR	Signal to Interference plus Noise Ratio
SISO	Single Input Single Output
SSB	Synchronization Signal Block
TCP	Transmission Control Protocol
TDD	Time Division Duplex (communication technique)
TSI	Technische Spezifikation für die Interoperabilität
UDP	User Datagram Protocol
UE	User Equipment
UIC	International union of railways (Union Internationale des Chemins de fer)
UPF	User Plane Function
USRP	Universal Software Radio Periphal
VC	Virtual Coupling
VCTS	Virtual Coupled Train Set