
Feldtest eines vernetzten autonomen Einschienenfahrzeugs MonoCab in einem 5G-Campusnetz

Timo Siekmann,¹ Boris Rohde²

Abstract: Die Bedeutung von automatisierten und autonomem Fahren nimmt auf der Straße und Schiene sowie in der Produktion (AGV) und Logistik (Indoor und Outdoor) kontinuierlich zu.[G.] Ein Technologiebaustein dafür ist eine anforderungsgerechte Vernetzung der Fahrzeuge. WLAN (Wireless Local Area Network) und Mobilfunk sind je nach Anwendungsfeld mögliche Kandidaten für diese Vernetzung. Die Mobilfunkgeneration 5G verspricht neue Funktionen wie u.a. Network Slicing, Uplink orientierte Mobilfunknetze, Layer 2/3 Transperency und Ultra Low Latency Communication (URLLC).[RP18] In diesem Beitrag werden 5G Messungen auf einem Testfeld mit State of the Art Hardw- und Software durchgeführt. Anhand der Messergebnisse im Beitrag ist zu sehen, dass 5G Campusnetze bereit sind die im Projekt erhobenen Anforderungen unter bestimmten Bedingungen zu erfüllen, Bis das volle Potential von 5G ausgeschöpft werden kann müssen die Hersteller jedoch weitere Funktionalitäten in ihre 5G Hardware implementieren.

Keywords: 5G Campusnetz; Vehicle to Vehicle Communication

1 Einleitung

Ein möglicher Weg zur Verkehrswende sowie der Minimierung von CO² ist die Automatisierung von ÖPNV Fahrzeugen wie z.B. Busse und Bahnen. Insbesondere die Automatic Train- oder die Remote Train Operation stellen hohe Anforderungen an die End-to-End Latenz sowie die Zuverlässigkeit des drahtlosen Kommunikationssystems.[3G19b] Dieser Beitrag beschreibt die Funknetzwerkplanung und Messung der Netzwerkperformance sowie Auswertung der Ergebnisse am Beispiel des 5G Feldtests im Projekt 5G-SIMONE (Sicher MOBil VerNEtzt), gefördert durch den 5G.NRW Förderwettbewerb vom Ministerium für Wirtschaft, Industrie, Klimaschutz und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen (MWI-KE),mit einem automatisierten Einschienenfahrzeug MonoCab, welches in Abbildung 1 zu sehen ist (<https://www.monocab-owl.de>). Das Fahrzeug fährt auf einer Schiene mit zwei hintereinander angeordneten Rädern und es wird durch zwei elektromechanische Kreisel sowie einer Verschiebemasse stabilisiert.

¹ Fraunhofer IOSB-INA, Campusallee 1, 32657 Lemgo, Land timo.siekmann@iosb-ina.fraunhofer

² Wireless.Consulting GmbH, Neulehenstraße 8a 33790 Halle (Westfalen), Deutschland br@wirelessconsulting.de



Abb. 1: MonoCab und Fraunhofer Leitstand

2 Fahrbetriebs Use-Cases

Die Folgenden Fahrbetriebs Use-Cases sollen mittels 5G Campusnetz als Übertragungsmedium relasiert werden.

- **Sicherer Verkehr durch Umgebungsinformationen**
- **Sicherer MonoCab-Begegnungsverkehr und Folgefahrten**
- **Fernsteuerung/ automatisiertes Zugvertrieb**
- **Infotainment und Nutzerinteraktion**

Die Fahrbetriebs Use-Case erfordern ein Closed loop Regler zu Regler Vernetzung von zwei oder mehr MonoCabs. Für eine optimale Regelung ist hochzuverlässige Funkverbindung mit einer geringen Latenz notwendig, besonders um Folgefahrten oder Begegnungsverkehr zu realisieren. Eine Übersicht der einzelnen Use-Cases ist in der 2

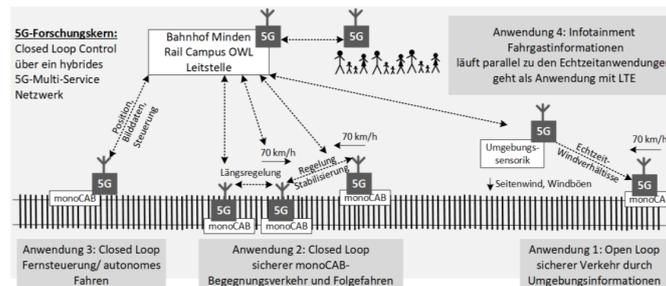


Abb. 2: 5G-SIMONE Use-Cases

Für die Fahrzeug-<-> Fahrzeug Vernetzung ist die Vehicle to Vehicle (V2V) sowie Vehicle to Infrastructure (V2I) eine hohe Relevanz.

Insbesondere die V2V Vernetzung im 5G Bereich verspricht eine besonders geringe Latenz

im Vergleich zur konventionellen 5G Kommunikation zwischen 5GUEs und gNodeBs. [WLK18]

3 Erhobene Anforderungen an die MonoCab Funkkommunikation

Die Anforderungen an das Kommunikationssystem, welches das MonoCab mit anderen MonoCabs sowie der Infrastruktur verbindet ergeben sich aus physikalischen Randbedingungen und gesetzlichen Vorgaben. Aus den physikalischen Randbedingungen wie zum Beispiel den Bremsweg des MonoCabs der durch die Bremskraft und den Schienen-Radkontakt vorgegeben ist oder aber auch durch die gesetzliche Vorgabe der Kameraauflösung beim Remote fahren, lassen sich Anforderungen an ein Kommunikationssystem ableiten. Zur Anforderungsanalyse wurden alle Funktionen und Applikationen des MonoCabs betrachtet und daraus acht Datenprofile abgeleitet. Die Datenprofile beschreiben die Applikationen wie Videoübertragung oder Hotspot und Notrufdaten mittels Kommunikationstechnik Parametern. Ein Datenprofil kann mit der Framesize, der Kommunikationsrichtung (Uplink oder Downlink), der maximalen Datenrate und Latenz ein Abbild der Applikation bilden.

Use-Case	Framesize (Bytes)	Delay RTT	Uplink (kbit/s)	Downlink (kbit/s)
Management	128	<100 ms	100	100
PLC	128	<50 ms	50	50
Video Fernsteuerung	1300	150 ms	55000	100
Audio Notruf	200	<100 ms	200	200
Infotainment	640	<150 ms	1000	1000
Video Public Safety	1300	500 ms	50000	100
Hotspot	1300	Best Effort	Best Effort	Best Effort
V2X	128	<50 ms	500	500

Tab. 1: Use-Case Anforderungen

Management

Unter Network Monitoring wird der Datenverkehr, der zum Betrieb von den Netzwerkteilnehmern Industrial Computer notwendig ist, bezeichnet. Dazu gehören unter anderem Protokolle wie das SNMP (Simple Network Management Protocol), RADIUS (Remote Authentication Dial-In User Service) oder auch NTP (Network Time Protocol). Der Datendurchsatz wurde aus Datenlogs sowie Erfahrungen aus vergangenen Projekten mit 100 kBit/s im Uplink sowohl auch im Downlink 100 kBit/s angenommen.

Control Data

Das MonoCab operiert automatisiert und kann ohne externen Eingriff fahren, bis ein Hindernis oder eine Fehlfunktion erkannt wird. In diesem Fall kann sich ein externer Mitarbeiter aus einem Leitstand mit dem MonoCab verbinden und sofern möglich das

MonoCab manuell per Remote Control steuern. Für die niedrig latente Steuerung hat dieses Datenprofil der höchste Latenzanforderung. Der Datenaustausch erfolgt bei diesem Datenprofil zyklisch. <https://www.overleaf.com/project/644b9c6ecc9dd84f779dd579>

Video Fernsteuerung

Unter dem Datenprofil Video Fernsteuerung ist die Bitrate einer Schwarz-Weiß Kamera des Partners Deutsche Bahn Systemtechnik herangezogen worden. Für die Bitrate wurde eine Kameraeinstellung von 1920x1080 Pixel (HD) unkomprimiert genutzt.

In diesem beschriebenen Szenario wird die Übertragung in der Uplink Richtung benötigt, die 5G Campusnetze sind hingegen öffentlichen Mobilfunknetzen durch variable Uplink-Downlink Ratio Konfiguration in der Lage hohe Uplink Datenraten zur Verfügung zu stellen. Die von Consumern genutzten öffentlichen Mobilfunknetze sind hingegen Downlink orientiert.

Audio Notruf

Das Datenprofil Audi Notruf umfasst die erforderlichen Daten im Up- und Downlink für eine Voice over IP Datenübertragung. Mit Hilfe des Audio Notruf soll im Störung- oder Gefahrenfall eine Full Duplex Verbindung zwischen MonoCab und Leitstand möglich sein.

Infotainment

Das Datenprofil Infotainment beinhaltet die Übertragung von Informationen welche zum Betriebsablauf des MonoCab notwendig sind wie die Nummer des MonoCabs, die Position des MonoCabs und die Fahrtrichtung. Mittels der Informationen kann landseitig ein Scheduling der MonoCabs erfolgen und ein Betriebskonzept umgesetzt werden. Im Fahrzeug selber sollen Informationen wie die nächste Haltestelle und der Fahrplan angezeigt werden.

Video Public Safety

Das Video Public Safety steht für eine Public Safety Überwachung, der Überwachung der Fahrgäste im Innenraum der Kabine. Die Public Safety Kamera ist ebenfalls mit einem Industriecomputer verbunden, welcher als RTSP Server agiert. Dadurch kann aus einem Leitstand auf den Kamerastream zugegriffen werden. Die Innenraumüberwachung unterliegt keinen Echtzeit Anforderungen und hat damit eine maximale Video Latenz von 500 ms.

Hotspot Data

Das Hotspot Data Profil umfasst einen WLAN Hotspot innerhalb des MonoCabs, diesen können Fahrgäste nutzen um weitere Informationen zum MonoCab Fahrplan zu erfragen oder um einen WLAN Traffic offload durchzuführen. Der WLAN Hotspot wird durch die WAN (Wide Area Network) Verbindung des 5G-Campusnetzes zur Verfügung gestellt und stellt eine Best Effort Datenrate sowie Latenz zur Verfügung.

V2X Data

Das Datenprofil V2X Data beschreibt die Kommunikation zwischen MonoCab und MonoCab sowie einem Leitstand. Der Betrieb von dem MonoCab benötigt den Eingriff von einer Leitstelle in Störungsfällen oder Gefahrensituationen. Diese Leitstelle überwacht den ordnungsgemäßen Betrieb des MonoCabs und kann im Fehlerfall das Fahrzeug Remote steuern. Dazu ist eine Übertragung von Daten wie die Fahrzeugposition, Geschwindigkeit sowie MonoCab spezifische Regelungsparameter elementar. Neben der Kommunikation mit einem Leitstand berücksichtigt dieses Datenprofil eine Kommunikation zwischen zwei oder mehr MonoCabs. Die Fahrzeuge tauschen Fahrzeugstatus wie Fahrzeugposition und Regler Werte unter einander aus und bilden so eine Closed-Loop Regler Vernetzung über ein 5G-System. Zusätzlich zu der Funkkommunikation über 5G gibt es die V2X Technologie. Der V2X Standard beschreibt die Kommunikation von Fahrzeug zu Fahrzeug oder Fahrzeug zu Infrastruktur ohne Verwendung von einer Netzwerkmanagement Hardware wie einem WLAN Access Point oder einem 5G Core. Die Technologie kann in Deutschland im Frequenzband von 5.9 GHz genutzt werden, dieses Frequenzband ist dabei von dem Standard IEEE 802.11p sowie 5G CV2-X nutzbar.

4 Planung der 5G Netzwerkabdeckung an der Teststrecke für den Feldtest

Das MonoCab Testfeld im Extertal, welches mit dem 5G Campusnetz abgedeckt werden soll ist 400 Meter lang. Damit im gesamten Gleisbereich eine hinreichende 5G Netzabdeckung verfügbar ist, müssen die Radio Units entsprechend platziert und parametrisiert werden. Die Dimensionierung des 5G-Campusnetztes erfordert im Optimalfall einen Empfangspegel am 5G UE, welcher höher ist als die Receiver Sensitivity des 5G UE Transceiver Chips ist. Zur Planung der Auslegung des 5G Campusnetztes wird die Netzabdeckung anhand einer Simulation für den Downlink ausgerechnet. Dazu wurden die Modelle aus dem Technical Report der 3GPP genutzt.[3G19a] Diese Modelle wurden aus Berechnungen und Labormessungen hergeleitet und versprechen eine hohe Annäherung an reale Umgebungen. In dem ersten Schritt werden die Pfadverluste berechnet und im zweiten Schritt mit dem Realwert verglichen.

Centerfrequency = 3.750 GHz maximale Distanz= 400 m $\alpha_{\sigma_{LOS}}$ = 1.7 dB Receiver Sensitivity= -84,5 dBm

$$PL'_{RMa-NLOS} = 161.04 - \log_{10}(5m) + 7.5 \log_{10}(5m) - (24.37 - 3.7(5m/10m) \log_{10}(10m) + (43.42 - 3.1 \log_{10}(10m))(\log_{10}(400.09m) - 3) + 20 \log_{10}(3.75GHz) - (3.2(\log_{10}(11.75 * 1.5m))^2 - 4.97))$$

Empfangspegel am Receiver= $gNodeBSendeleistung - PL'_{RMa-NLOS}$

Empfangspegel am Receiver @ 400m= 24dBm - 133.31dB = -109.31dBm

Empfangspegel am Receiver @ 200m= 24dBm - 121.18dB = -97.189dBm

Wie oben beschrieben, wurde eine 5G Lizenz für die Testmessung bei der BNetzA beantragt. Dabei wurden 100 MHz im Frequenzbereich von 3,7 GHz bis 3,8 GHz genehmigt. Daraus ergibt sich einer Center Frequency von 3,75 GHz.

Die Betrachtung des None Line of Side Pfadverlust mit einem Rural Macro Modell zeigt, dass die theoretische Empfangsfeldstärke nach 400 m am 5G UE -109 dBm beträgt. Hinzu kommen noch weitere Einflussfaktoren wie die Dämpfung der MonoCab Kabine welche das Signal ebenfalls abschwächt. Erste Tests mit einer Remote Radio Unit zeigen im letzten Bereich der Teststrecke Verbindungsabbrüche, bedingt dadurch das der Empfangspegel am 5G-UE zu gering ist, können keine 5G User- sowie Control Plane Daten mehr empfangen und gesendet werden.

Eine weitere Kalkulation mit zwei Remote Radio Units ergibt eine deutlich bessere Empfangsfeldstärke am 5G-UE. Wenn zwei Remote Radio Units im Abstand von 200 Meter eingesetzt werden, ergibt sich jeweils nach 200 Metern ein minimaler Empfangspegel von -97 dBm. Der Versuch auf dem Testfeld zeigt keine Verbindungsabbrüche mehr und ein Video Teststream über das 5G-System läuft ruckelfrei. Da das verwendete Nokia NDAC System ein Single Cell System ist, sind beide Radio Units in der gleichen physikalischen Zelle eingebunden und führen unter Bewegung der 5G-UEs somit ein intra cell handover aus.

Im Folgenden wurde das 5G Campus Netzwerk vor Ort aufgebaut und eine Network Coverage Survey durchgeführt. Die Survey erfolgt mittels Mess Software auf einem Tablet, welches mit dem 5G-System verbunden ist. Die Survey Software auf dem Tablet nimmt die Empfangswerte vom 5G-Chip des Tablets entgegen und kartiert diese. In der Survey wird ausschließlich der 5G Downlink betrachtet. Als Metrik für den Empfangspegel wird der RSRP Wert von dem Secondary Synchronization Signal genutzt. Die Abbildung 3 zeigt die verschiedenen Signalpegel an der Strecke mit zwei installierten ASiR-pRRH Radio Units. Dabei ist zu sehen das nahe der Remote Radio Unit der Empfang bei -68 dBm liegt, dieser Wert ist nahezu der bestmögliche Empfangspegel. Außerdem lässt sich beobachten das sich der Empfangspegel mit steigender Entfernung zur Radio Unit verringert. Die Survey Ergebnisse zeige außerdem, dass die Simulationsergebnisse sehr nah an den gemessenen Werten liegen.



Abb. 3: Coverage Survey auf dem MonoCab Testfeld 1

5 Durchführung und Ergebnisse der Feldtest

Nachdem die Funktionalität der Applikationen erprobt wurde, soll die Leistungsfähigkeit des 5G Campusnetzes gemessen werden. Die Leistungsbewertung wie z.B. die End-to-End Latenz kann bei einer Videoübertragung durch eine Glass to Glass Messung gemessen werden. In diesem Verfahren filmt die Kamera einen Monitor auf dem eine Atomuhrzeit angezeigt wird und überträgt den Videostream auf einen Ausgabemonitor. Auf dem Ausgabemonitor muss ebenfalls eine Atomuhrzeit dargestellt werden, dann kann durch ein Einfrieren des Bildschirms die Latenz zwischen Videoaufnahme und Empfang gebildet werden. Das Verfahren eignet sich sehr gut für die Ermittlung von Video Latenzen jedoch aber nicht von der Ermittlung der Latenz bei Datenübertragungen, daher wir hier ein anderes Messverfahren benötigt. Eine gute Vergleichbarkeit bietet das ITU-T Standard Messverfahren ITU-T y.1564. In diesem Verfahren können die Datenprofile übertragen und ausgewertet werden. Das Messverfahren besteht aus zwei Messungen, zum einem werden alle Datenprofile sequentiell ausgeführt und unabhängig voneinander ausgewertet. Dabei werden die einzelne Datenprofile Schrittweise ausgeführt und die Datenrate iterativ erhöht, die Schritte sind 50%, 75%, 90% der Datenrate und 100 % der Datenrate. Die Zweite Messung überträgt alle Datenprofile parallel über das 5G-System und stellt die maximale Datenrate eines MonoCabs dar. Dieser Test ermöglicht die Auswertung der Quality of Service pro Datenprofil, dadurch kann eine Beeinflussung unterschiedlicher Datenprofile sicher erkannt werden.

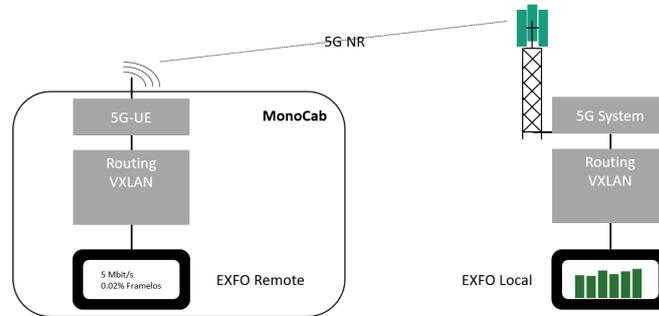


Abb. 4: Messaufbau am 03.10.2023

Funktechnisch wurde diese Strecke mit einem Nokia NDAC 5G-System SA ausgeleuchtet, welches mit einer physikalischen Radio Cell ausgestattet ist indem zwei ASiR-pRRH Radio Units platziert wurden. Die ASiR-pRRH Radio Units verfügen über eine maximale Sendeleistung von 250mW/ 24dBm. Diese Sendeleistung ist für einen Empfangspegel von > -100 dBm entlang der Strecke ausreichend. Dem Datenblatt der Modemhersteller zufolge soll am Modem jedoch ein Empfangspegel von > -84.5 dBm anliegen [Que22]. Die Messergebnisse zeigen das eine Konnektivität zwischen dem gNodeB und dem Modem auch zwischen der empfohlenen Empfangsfeldstärke und dem Verbindungsverlust besteht, diese jedoch keine hohe sowie zuverlässige Dienstgüte aufweist.

Anhand der Ergebniss Plots, welche die einzelnen Datenprofile in Abhängigkeit der Empfangsfeldstärke aufzeigen, lässt sich ableiten das die RTT Latenz mit fallender Empfangsfeldstärke steigt. Dieses Verhalten zeigen die Abbildung 5, es werden die eingeführten Datenprofile auf der X-Achse und die RTT Latenz auf der Y-Achse aufgetragen. Die Abbildung zeigt die Messergebnisse des Service Configuration Test bei einem Empfangspegel am 5G UE von -50 dBm, -85 dBm und -100 dBm. Die schwarz gestrichelte Linie in der Abbildung ist bei 50 ms gezogen und dient als Orientierungshilfe sowie als maximale Latenzgrenze für das Datenprofil PLC sowie V2X. Weiterhin zeigt das Ergebnis in 5, dass das 5G-Campusnetz bei einem Empfangspegel von -100 dBm nicht in die notwendige Dienstgüte für das Datenprofil Video Fernsteuerung aus Tabelle 1 erreicht.

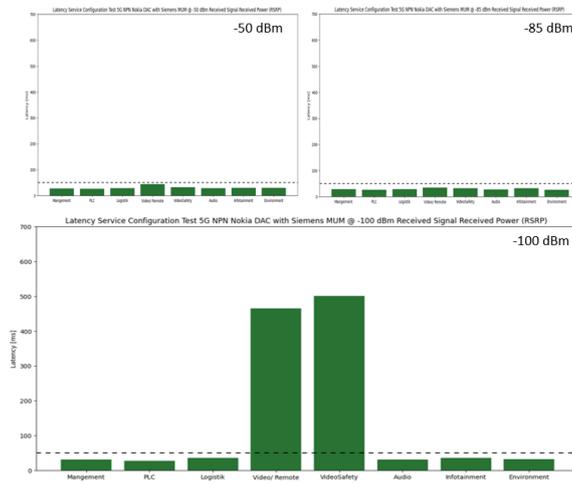


Abb. 5: Service Configuration Test -50dBm, -85dBm, -100dBm

In der Abbildung 6 werden die Ergebnisse des Service Performance Test bei einem Empfangspegel von -50dBm, -85 dBm und -100 dBm am 5G UE dargestellt. Die Betrachtung der Latenz der Datenprofile zeigt das mit einem Empfangspegel von -50 dBm sowie -85 dBm die Dienstgüte aller Datenprofile eingehalten werden kann. Bei einem Empfangspegel von -100 dBm ist jedoch zu sehen das keine Dienstgüte mehr eingehalten werden kann. Außerdem sind die Latenzen der Datenprofile alle gleich groß, was eine Überlastung des 5G UEs vermuten lässt.

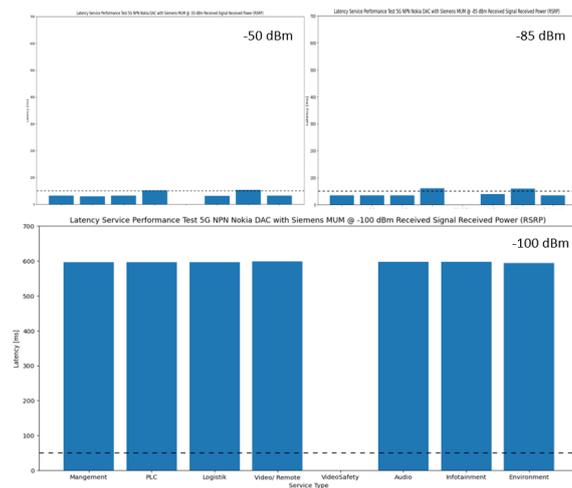


Abb. 6: Service Performace Test für -50dBm, -85dBm und -100dBm

6 Fazit

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass sich das 5G Campusnetzwerk im Testfeld ähnlich verhalten hat wie die Simulationsergebnisse in Hinsicht auf die Netzwerkabdeckung im Verhältnis zur Reichweite. Die zuvor definierten Anforderungen konnten unter Rücksicht auf einen ausreichenden Empfangspegel erfüllt werden. Ein Ergebnis dieses Beitrags ist also das der Empfangspegel ausreichend stark sein muss um die gegebene Latenz nicht zu überschreiten. Die Ergebnisse zeigen auch das verschiedenen Datenprofile und damit verschiedene Protokolle nicht priorisiert werden.

Ausblickend auf weitere Funktionen aus dem 3GPP Standard wie Network Slicing und URLLC soll im weiteren Verlauf die Priorisierung auf PDU Session oder Protokoll Level untersucht werden. Außerdem sind weitere Feldtest im Projekt 5G-SIMONE mit Radio Units für eine Fernfeld Funkausleuchtung geplant.

Literaturverzeichnis

- [3G19a] 3GPP: Technical Specification Group Radio Access Network; Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz. Technical Report (TR) 38.901, 3rd Generation Partnership Project (3GPP), 09 2019. Version 15.1.0.
- [3G19b] 3GPP: Technical Specification Group Services and System Aspects; Mobile Communication System for Railways. Technical Specification (TS) 22.289, 3rd Generation Partnership Project (3GPP), 12 2019. Version 17.0.0.
- [G.] G.Fuchslocher: , BMW schickt Autos autonom durchs Werk. <https://www.automobilproduktion.de/produktion/bmw-schickt-autos-autonom-durchs-werk-637.html>. (Accessed: Feb. 17, 2023).
- [Que22] Quectel Wireless Solutions Co., Ltd. RM50xQ Series Hardware Design, 2022. Status released.
- [RP18] Rao, Sriganesh K; Prasad, Ramjee: Impact of 5G technologies on industry 4.0. Wireless personal communications, 100:145–159, 2018.
- [WLK18] Wang, Jiadai; Liu, Jiajia; Kato, Nei: Networking and communications in autonomous driving: A survey. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 21(2):1243–1274, 2018.